

XPS-ROUTAERISTELEVYT RATARAKENTEES- SA,

250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot

- o **Antti Nurmikolu**
- o **Pauli Kolisoja**

XPS-ROUTAERISTELEVYT RATARAKENTEESSA,

250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot

- o Antti Nurmikolu**
- o Pauli Kolisoja**

RHK
RATAHALLINTOKESKUS
KAIVOKATU 6, PL 185
00101 HELSINKI

PUH. (09) 5840 5111
FAX. (09) 5840 5140
SÄHKÖPOSTI: info@rhk.fi

ISBN 952-445-047-x
ISSN 1455-2604

Nurmikolu, Antti – Kolisoja, Pauli: XPS-routaeristelevyt ratarakenteessa, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. Helsinki 2001. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 2/2001. 97 sivua ja 3 liitettä. ISBN 952-445-047-x, ISSN 1455-2604.

Avainsanat: suulakepuristettu, polystyreeni, XPS, routalevy, routaeristys, ratarakenne

TIIVISTELMÄ

Työssä oli kaksi päätavoitetta, joiden saavuttamiseksi tutkimusalueeseen perehdyttiin aluksi kirjallisuustutkimuksella. Työn varsinaisena tavoitteena oli ensinnäkin muodostaa näytteenoton ja laboratoriotutkimusten avulla käsitys ratarakenteeseen jo asennettujen suulakepuristettujen XPS-routalevyjen lämmönvastuksen heikkenemisestä kyseisessä rasitusympäristössä. Toisaalta tavoitteena oli käyttämättömien XPS-routalevyjen laboratoriotutkimusten perusteella arvioida, vaikuttaako sallitun akselikuormituksen mahdollinen korottaminen routalevyn vaurioitumiseen.

Ympäristövaatimusten vuoksi XPS-routalevyjen tuotannossa tarvittavana ponnekaasuna käytetyistä raskasmolekyylikaasuista on siirrytty käyttämään hiilidioksidia pääponnekaasuna, minkä johdosta levyn lämmönjohtavuus on kasvanut asennusvaiheessa selvästi. Ratarakenteen rasitusympäristössä levyyn imeytyvä kosteus heikentää routalevyn lämmönvastusta eniten. Aiempien seurantatutkimusten perusteella voidaan arvioida, että nykyvaatimukset täyttävään XPS-routalevyyn kerääntyy ratarakenteessa kosteutta noin 10-12 tilavuusprosenttia 40 vuoden käyttöiän aikana. Kostumisen seurauksena levyn lämmönjohtavuus ei tule säilymään etenkin nykyisen hiilidioksidilla paisutetun tuotannon osalta ratarakenteen routamitoituksessa oletetulla 0,037 W/Km tasolla, minkä vuoksi ratarakenteessa käytettävien routaeristeiden mitoitusta on syytä tarkistaa.

Ratarakenteessa 3 - 10 vuotta olleista XPS-routalevyistä otetun 12 näytekappaleen ja niiden vesipitoisuus- ja lämmönjohtavuusmittausten perusteella voidaan todeta, että nykyvaatimukset täyttävät levyt ovat säilyttäneet lämmönvastuksensa melko toivotusti. Sen sijaan heikkokuntoisia olivat Finnfoam Oy:n mitä ilmeisimmin vuosina 1989 – 1990 toimittamista levyistä otetut näytteet. Levyt eivät todennäköisesti täyttäneet nykyisiä vaatimuksia rataan asennettaessa. Näiden levyjen osalta voidaan todeta, että lämmönvastus oli alentunut jo nyt alle 50 %:iin alkuperäisestä ja kaikkein heikoin näytekappale oli menettänyt eristyskykynsä miltei kokonaan. Tulosten perusteella routalevyihin kohdistettuja vaatimuksia ei ole tarpeen kiristää nykyisillä akselikuormilla.

Käyttämättömille routalevyille tehtyjen puristuskokeiden ja routalevyihin ratarakenteessa kohdistuvaa syklistä rasitusta simuloivien väsymiskokeiden tulosten pohjalta luotiin laskentamalli mahdollisen akselikuorman korottamisen myötä aiheutuvasta routalevyn vaurioitumisliisäyksestä. Laskelmien perusteella nykyisen minimipuristuslujuusvaatimuksen täyttävien levyjen vaurioituminen lisääntyy 22 - 35 % siirryttäessä 225 kN:sta 250 kN:n akselikuormaan, kun levyyn kohdistuva kumulatiivinen kuormitus säilyy samana. Vastaavalla tavalla laskettuna vaurioitumisen lisäys siirryttäessä 225 kN:sta 300 kN:n akselikuormaan on 82 - 146 %. Epävarmuutta vauriolisäyslaskelmissa aiheuttaa routalevyyn kohdistuvan kuormitustason suuruus sekä

ekstrapolointi, jonka avulla vaurioitumisarvio ulotettiin 300 miljoonaa bruttotonnia vastaavaan junakuormitukseen.

Levyn puristuslujuuden ja väsymiskokeessa muodostuvan kokoonpuristuman välillä havaittiin suuntaa antava korrelaatio, jonka perusteella vaurioitumisen lisääntyminen voidaan uusien rataa asennettavien levyjen osalta kumota kiristämällä puristuslujuusvaatimusta 500 kPa:iin, kun on kyse siirtymisestä 250 kN:n akselikuormiin. Siirryttäessä 300 kN:n akselikuormiin tulisi puristuslujuusvaatimusta kiristää vastaavasti 600 kPa:iin.

Tutkimuksen perusteella ratarakenteessa roudan eristämistarkoituksessa käytettäville XPS-routalevyille luotiin tekniset toimitusehdot luonnosvaiheessa olevan CEN-normin sallimissa puitteissa.

Nurmikolu, Antti – Kolisoja, Pauli: XPS-Frost Insulation Boards in Track Structure, 250 kN and 300 kN axle loads. Finnish Rail Administration, Technical Unit. Helsinki 2001. Publications of the Finnish Rail Administration A 2/2001. 97 pages and 3 enclosures. ISBN 952-445-047-x, ISSN 1455-2604.

Key words: extruded, polystyrene, XPS, frost insulation board, frost insulation, track structure

ABSTRACT

This study focused on two main purposes. To achieve the purposes the backgrounds of the research area were studied by a literature review for a start. The actual aim of the study was firstly to consider the weakening of the thermal resistance of extruded polystyrene (XPS) frost insulation boards in the loading environment of track structure. Secondly, by the laboratory investigations of unused XPS-boards, the aim was to estimate the increase, due to possible raising of allowed axle load, in the degradation of XPS-boards.

Due to environmental standards, the blowing agents, which are needed in the manufacturing of XPS-products, have been changed from CFC- and HCFC-compounds to carbon dioxide. Because of this, the thermal conductivity of the XPS-boards has efficiently increased. The thermal conductivity of XPS-boards increases in track structure too, mostly due to water absorption. Based on former studies, the moisture content absorbed by XPS-board during its 40 year service life is approximately 10-12 vol.%. In consequence of moisture absorption, the thermal conductivity of the XPS-boards, especially of boards blown by carbon dioxide, will not remain in the level of 0,037 W/Km, which is assumed in frost dimensioning of track structure. Due to that, the frost dimensioning of track structures should be revised.

Based on 12 samples taken from XPS-boards after 3-10 years service in track and their determined moisture content and thermal conductivity it can be said, that the thermal resistance of the boards conforming with the existing requirements has remained on a quite desirable level. However, the samples manufactured by Finnfoam Oy presumably in years 1989-90 were fairly much damaged, but this production has hardly met the present requirements. The thermal resistance of these boards has reduced even until now below 50 % of the initial value and the weakest one has practically lost its ability to act as a thermal insulator. Based on the results of the research, the existing requirements for frost insulation boards do not need to be tighten when dealing with axle loads allowed today.

The effect of possible increase in the allowedable axle load on the increase of degradation of XPS-boards was considered by calculations based on compressive tests and fatigue tests, which implies the cyclic loading characteristic of train traffic. Calculations indicate that with the equivalent cumulative loading applied to insulation boards, which conform with the existing requirement for compressive strength, the degradation of boards will increase 22 % - 35 % when raising the axle load from 225 kN to 250 kN. When it is question about raising the axle load from 225 kN to 300 kN the increase in degradation will be 82 – 146 % respectively. The uncertainty of calculations is mostly due to uncertainty of loading applied to insulation board.

Indicative correlation between the compressive strength of the board and the results of fatigue test was found. Based on the correlation and calculations the increase in degradation of frost insulation boards can be compensated by tightening the requirement for compressive strength to 500 kPa when it is question about 250 kN and to 600 kPa when it is question about 300 kN.

Based on the research, the technical terms of delivery for the XPS- frost insulation boards used in Finnish railways were created in the frames defined by the draft of European standard for XPS frost insulation boards.

ESIPUHE

Tämä XPS-routaeristelevyjen käyttäytymistä ratarakenteessa käsittelevä tutkimus on osa Ratahallintokeskuksen (RHK) 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoon liittyvää tutkimusta. Tutkimus on tehty Tampereen teknillisen korkeakoulun (TTKK) geotekniikan laboratoriossa. Raportin ovat laatineet tutkija, DI Antti Nurmikolu ja professori Pauli Kolisoja. Tutkimuksen on rahoittanut RHK.

Tutkimuksen etenemistä ohjasi johtoryhmä, johon kuuluivat ylitarkastajat Pasi Leimi ja Kari Pulli RHK:n teknisestä yksiköstä sekä suunnitteluosaston päällikkö Harry Harjula ja suunnittelija Juha Heinonen Oy VR-Rata Ab:sta.

Helsingissä, maaliskuussa 2001

Ratahallintokeskus
Tekninen yksikkö

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT	5
ESIPUHE	7
SISÄLLYSLUETTELO	8
1 JOHDANTO.....	10
2 RATARAKENTEEN ROUTAERISTYS.....	11
2.1 Routaeristeiden käytön periaate.....	11
2.2 Routaeristemateriaalit	11
2.2.1 Suulakepuristettu polystyreeni (XPS) ja muottipaisutettu polystyreeni (EPS).....	11
2.2.2 XPS-levyn valmistusprosessi	12
2.2.3 Ponneaineet XPS-levyn valmistuksessa.....	12
2.3 Routalevyltä vaaditut ominaisuudet.....	13
2.3.1 Yleiset vaatimukset routalevylle.....	13
2.3.2 RHK:n nykyiset vaatimukset routalevylle	14
2.3.3 CEN-normiluonnoksen vaikutus XPS-levyn vaatimuksiin.....	14
2.4 Ratarakenteen routamitoitus.....	16
2.4.1 Tausta	16
2.4.2 Mitoituksen teoreettinen perusta.....	17
2.4.3 Routalevyn mitoitus	22
2.5 Routalevyjen asennus.....	28
2.5.1 Asennustavat.....	28
2.5.2 Asennetut levymäärät ja levyvalmistajat	31
3. RADAN KUORMITUSYMPÄRISTÖN VAIKUTUS XPS-ROUTALEVYYN.....	33
3.1 Yleistä	33
3.2 Solukaasun vaihtuminen	33
3.3 Kosteus.....	36
3.3.1 Kosteuden imeytyminen routalevyyn	36
3.3.2 Routalevyn kosteuspitoisuuden lisääntyminen rata- ja tierakenteissa	37
3.3.3 Kosteuden absorptio vaikutus routalevyn lämmönjohtavuuteen.....	43
3.4 Mekaanisen kuormituksen kestävyys.....	46
3.4.1 Routalevyyn kohdistuva mekaaninen kuormitus ratarakenteessa	46
3.4.2 Puristuslujuus.....	49
3.4.3 Syklisen kuormituksen kestävyys, väsymiskestävyys	51
4. LEVYNÄYTTEENOTTO RADASTA JA NÄYTTEIDEN LABORATORIOTUTKIMUKSET	53
4.1 Tavoite.....	53
4.2 Näytteenotto	53
4.2.1 Näytteenottokohteiden valinta.....	53
4.2.2 Näytteenottomenetelmä.....	54
4.2.3 Otetut näytteet.....	54

4.3 Näytteiden laboratoriotutkimukset	58
4.3.1 Tutkimusmenetelmät	58
4.3.2 Mekaaniset vauriot	59
4.3.3 Vesipitoisuudet ja lämmönjohtavuudet	63
5. LABORATORIOKOKKEET KÄYTTÄMÄTTÖMILLE XPS-LEVYILLE	66
5.1 Yleistä	66
5.2 Tutkimuksissa käytetyt levyt	66
5.3 Tiheys ja paksuus	68
5.4 Staattinen puristuskoe	70
5.4.1 Puristuskoeomenetelmä	70
5.4.2 Puristuskokeiden tulokset	71
5.5 Väsymiskäyttäytyminen	75
5.5.1 Väsymiskoejärjestelyt	75
5.5.2 Väsymiskokeet	77
5.5.3 Kuormitustason vaikutus levyn kokoonpuristumaan	79
5.5.4 Levytyyppien keskinäinen vertailu	83
5.5.5 Staattisen puristuslujuuden ja väsymiskäyttäytymisen korrelaatio	85
5.6 Lämmönjohtavuus	88
6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSTARPEET	90
6.1 Materiaali	90
6.2 Lämmönjohto-ominaisuudet	90
6.3 Mekaaniset ominaisuudet	91
LÄHDELUETTELO	94
LIITTEET	
1. XPS-routalevyjen tekniset toimitusehdot	
2. Lämmönjohtavuusmittausten tutkimusselostus	
3. Väsymiskokeiden yhteenvetolomakkeet	

1 JOHDANTO

Suulakepuristetusta polystyreenistä (XPS) valmistettuja routalevyjä käytetään rata-rakenteessa hidastamaan roudan etenemistä radan rakennekerroksissa. Routalevyjen avulla voidaan vähentää radan routimishaittoja maamateriaaleista rakennettuun rataan verrattuna selvästi pienemmillä rakennepaksuuksilla. XPS-routalevyjen käyttö perustuu hyvään lämmönvastukseen ja sen säilymiseen ratarakenteessa vallitsevassa ankarassa kuormitusympäristössä.

RHK:n 250 kN:n ja 300 kN:n akselikuorman käyttöönnoton mahdollisuuksia selvittämissä tutkimuksissa on tutkittu, miten kyseisiin akselikuormiin siirtyminen vaikuttaa radan eri rakenneseisiin. Tässä tutkimuksessa paneudutaan ratarakenteen kuormitusympäristön aiheuttamaan XPS-routalevyjen lämmönvastuksen heikkenemiseen ensinnäkin nykyisten akselikuormien synnyttämissä ja toisaalta akselikuormien mahdollisen korottamisen jälkeisissä rasitusolosuhteissa. Lisäksi selvitetään rata-rakenteen routaeristykseen mitoitusperusteita ja erityisesti XPS-routalevyjen ominaisuuksia routamitoituksen kannalta. Tässä tutkimusprojektissa Teknillisen korkeakoulun tielaboratorio (TKK/TIE) on aiemmin tehnyt esiselvityksen routalevyistä, jonka tuloksia hyödynnetään erityisesti levynäytteiden kosteuspitoisuuksien osalta.

Tutkimusalueen taustojen selventämiseksi tehtiin kirjallisuusselvitys, jonka havaintoja käsitellään raportin kappaleissa 2 ja 3. Kappaleessa 2 perehdytään routaeristemateriaaleihin, niiltä vaadittaviin ominaisuuksiin ja valmisteilla olevan, ratarakenteessa käytettäviä XPS-routalevyjä koskevan CEN-normin myötä tuleviin muutoksiin. Edelleen tarkastellaan ratarakenteen routamitoitusta sekä routalevyjen asennusta. Kappaleessa 3 selvitetään radan kuormitusympäristön vaikutuksia XPS-routalevyyn. Tarkastelun kohteina ovat erityisesti XPS-routalevyjen solujen sisältämän kaasun vaihtuminen, levyyn imeytyvä kosteus ja sen vaikutus levyn toimintaan sekä levyjen kestävyys mekaanista kuormitusta vastaan.

XPS-routalevyjen lämmönvastuksen säilymistä nykyisten akselikuormien synnyttämissä rasitusympäristöissä selvitetään ratarakenteesta otettujen näytteiden ja niiden kosteuspitoisuus- ja lämmönjohtavuusmittausten nojalla kappaleessa 4.

Kappaleessa 5 on esitetty käyttämättömille XPS-routalevyille tehdyt tiheys- ja paksuusmääritykset, puristuskokeet, toistuvaa syklistä junakuormitusta simuloivat väsymiskokeet sekä lämmönjohtavuusmittaukset tuloksineen. Puristus- ja väsymiskoe tuloksia analysoimalla on luotu laskentamalli, jolla arvioidaan akselikuorman korottamisen seurauksena routalevyyn aiheutuvaa vauriolisäystä. Samassa yhteydessä esitetään laskennan tuloksena routalevyille asetettaviin laatuvaatimuksiin edellytetyt tiukennukset, joilla on mahdollista estää akselikuorman korottamisesta aiheutuva vauriolisäys. Kappaleen lopuksi pohditaan ratarakenteen routaeristykseen mitoituksen toimivuutta käyttämättömistä levyistä mitattujen lämmönjohtavuuksien perusteella. Johtopäätökset koko tutkimuksen yhteydessä tehdyistä selvityksistä on esitetty kappaleessa 6.

2 RATARAKENTEEN ROUTAERISTYS

2.1 Routaeristeiden käytön periaate

Periaatteena ratarakenteen routimisen estämisessä on se, että radan rakennekerrokset ovat routimattomia siihen syvyyteen saakka, johon routa mitoituspakkasmäärällä tunkeutuu. Maamateriaaleista rakennetussa radassa tämä saattaa johtaa varsin suureen eristyskerrospaksuuteen (ks. kappale 2.4.3). Kun rakenteessa käytetään maamateriaaleja huomattavasti alhaisemman lämmönjohtavuuden omaavia routaeristeitä, roudan tunkeutuminen routivaan maahan on mahdollista estää pienemmällä rakennepaksuudella.

Routaeristeiden tehtävä ratapenkereessä on hidastaa maahan varastoituneen lämmön poistumista pakkaskauden aikana ja täten lisätä radan routavastus sellaiselle tasolle, että radan rakennekerrosten alapuolinen routiva pohjamaa tai penger ei routaannu [33]. Näin vältetään radan routimisesta aiheutuvat virheet raidegeometriassa. Routaeristeitä tarvitaan silloin, kun pohjamaan tai penkereen materiaali on routivaa ja routimattomien rakennekerrosten - tuki-, väli-, eristys- ja suodatinkerrosten - yhteispaksuus ei ole riittävä estämään roudan tunkeutumista routivaan materiaaliin [25]. Käytännössä routaeristeiden asennus tehdään uutta rataa rakennettaessa tai tukikerroksen puhdistuksen yhteydessä (ks. kappale 2.5.1).

2.2 Routaeristemateriaalit

2.2.1 Suulakepuristettu polystyreeni (XPS) ja muottipaisutettu polystyreeni (EPS)

Routaeristeeseen ratarakenteessa kohdistuva kuormitus on erittäin suuri verrattuna kuormituksiin routaeristeiden muissa käyttökohteissa, kuten esimerkiksi rakennusten perustuksissa tai putkistojen, piha-alueiden ja teiden routasuojauksessa. Lisäksi kuormitus on luonteeltaan toisenlaista, syklistä. Tämä asettaa erityisvaatimuksen eristeen kuormituskestävyydelle. Radan routaeristeinä käytetään nykyisin ainoastaan suuren puristuslujuuden (> 450 kPa) omaavaa suulakepuristettua polystyreenilevyä, josta käytetään lyhennettä XPS, eXtruded PolyStyrene. Aiemmin 1970-luvulla, käytettiin myös muottipaisutettua polystyreeniä (EPS, Expanded PolyStyrene), jonka käytöstä kuitenkin luovuttiin vuonna 1980 sen kosteudenvastustuskyvystä saatujen huonojen kokemusten takia. Nykyisin on saatavana 1970-luvun EPS-levyihin verrattuna sekä kosteudenvastustuskyvyn että puristuslujuuden osalta parempilaatuista EPS:ää [32].

Polystyreenieristeet eivät lahoa ja kestävät hyvin epäorgaanisia aineita ja pakkasta. Yleensä polystyreenieristeet palavat sytytettyinä, mutta nykyisin on saatavilla myös paloa hidastavia laatuja [19]. XPS-eristeet ovat sulamattomia noin $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan saakka ja niiden leimahduspiste on noin $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa [4, 8]. Suulakepuristetun polystyreenin mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavat levyn tiheyden lisäksi seinämien vahvuus ja suunta [15].

Sekä EPS- että XPS-eristeiden hyvä lämmönvastus on seurausta niiden umpisoluisesta rakenteesta. Lämmöneristävyyden lisäksi suulakepuristetun polystyreenin käyttö routa-

eristeenä pohjautuu sen kuormituskestävyyteen, jonka ansiosta sen lämmönvastus säilyy myös käyttöolosuhteiden rasituksissa tyydyttävällä tasolla. Levyn lämmönvastuksen heikkenemistä radan kuormitusympäristössä kosteuden absorption ja mekaanisen rasituksen vaikutuksesta selvitetään kappaleessa 3.

2.2.2 XPS-levyn valmistusprosessi

Suulakepuristetun polystyreenin valmistus perustuu pitkälti punneaineiden käyttöön. Aluksi polystyreeni ja muut apuaineet sulatetaan ekstruuderilla, minkä jälkeen massan painetta nostetaan. Polymeerisulaan syötetään punneaine, joka käyttäytyy korotetussa paineessa nesteen tavoin. On tärkeää, että punneaineen liukenevuus paineistettuun polymeerisulaan on riittävä. Paineen alentuessa punneaineen tiheys pienenee ja tilavuus kasvaa. Näin punneaine vaahdottaa polystyreenin, kun paine laskee nopeasti puristettaessa seos suuttimesta ulos ohjainlevyjien väliin. Samalla polystyreeni jäähtyy, jolloin sen viskositeetti kasvaa ja rakenne jähmettyy. [13, 31]

Sulan massan viskositeetti on ominaisuus, joka määrää vaahdotusprosessin onnistumisen. Viskositeettiä nostetaan riittävästi ennen suutinta pääosin massan lämpötilaa alentamalla. Liian alhainen viskositeetti johtaa solun kontrolloimattomaan kasvuun ja sitä kautta solurakenteen luhistumiseen. Liian korkea sulaviskositeetti taas aiheuttaa epätäydellisen vaahtoutumisen, minkä takia ei saavuteta toivottua alhaista tiheyttä. Vaahdotusprosessi on onnistunut, kun vaahdolle saavutetaan haluttu tiheys ja solurakenne on umpisoluinen, eli soluseinämät eivät ole revenneet solun kasvaessa. [13, 31]

2.2.3 Punneaineet XPS-levyn valmistuksessa

Punneaineella on merkitystä valmistusprosessin onnistumisen lisäksi myös valmiin levyn lämmönjohtavuuden kannalta, sillä punneaine jää valmistusprosessissa kaasuksi levyn sisään muodostuviin umpinaisiin soluihin. Vuoteen 1989 saakka XPS-levyn valmistuksessa käytettiin punneaineena kloorifluorihiilivety-yhdistettä (CFC 12). CFC-punneaineet olivat ihanteellisia punneaineita sekä valmistuksessa että solukaasuina. Niiden lämmönjohtavuus on erittäin huono verrattuna esimerkiksi ilmaan (ks. taulukko 2.1). Tästä syystä CFC-punneaineilla vaahdotetun XPS-levyn lämmönjohtavuus on alhaisempi kuin EPS-levyn, sillä EPS-levyissä solukaasuna on ilma. CFC-punneaineilla vaahdotetun XPS-levyn lämmönjohtavuus kasvaa hitaasti ajan myötä solukaasun diffusoituessa ulos soluista ja niiden täyttyessä lopulta ilmalla (ks. kappale 3.2).

Taulukko 2.1. Eri kaasujen lämmönjohtavuuksia +10 °C lämpötilassa [22].

Kaasu	Kaava	λ_{10} [W/mK]
Freon 11 (CFC 11)	CF Cl ₃	0,008
Freon 12 (CFC 12)	CF ₂ Cl ₂	0,010
Hiilidioksidi	CO ₂	0,016
Ilma	N ₂ + O ₂ + muut	0,025

CFC-ponneaineiden käyttö kuitenkin kiellettiin ns. Montrealin sopimuksella niiden ilmakehän otsonikerrosta tuhoavan vaikutuksen vuoksi. Vuodesta 1989 vuoteen 1999 suomalainen materiaalivalmistaja Finnfoam Oy käytti ponneaineena HCFC-yhdisteitä, joiden käytön vaikutus otsonikerroksen tuhoutumiseen on huomattavasti pienempi kuin CFC-yhdisteillä, mutta kuitenkin merkittävä. Ruotsalainen materiaalivalmistaja Dow Sverige AB siirtyi HCFC-ponneaineiden käyttöön vuonna 1992. Myös HCFC-yhdisteiden käyttö kiellettiin ja niinpä vuodesta 1999 alkaen Finnfoam Oy on käyttänyt ponneaineena kaasuseosta, jossa pääaineena on hiilidioksidi, CO_2 . Dow Sverige AB:n nykytuotannossa ponnekaasuna on hiilidioksidi, joka on peräisin muista tuotanto-prosesseista tai luonnollisista lähteistä [10]. Taulukossa 2.2 on esitetty kertoimilla eri ponneaineiden vaikutusta otsonikerroksen tuhoutumiseen sekä kasvihuoneilmiöön [31].

Taulukko 2.2. Eri ponneaineiden ekologiset arvot [31].

Ponneaine	Kemiallinen nimitys	Otsonikato	Kasvihuoneilmiö
CFC 12	Dikloorifluorimetaani	1,0	7300
HCFC 22	Monoklooridifluorimetaani	0,05	1500
HCFC 142b	Monoklooridifluorieteeni	0,06	1600
HFC 134a	Tetrafluorieteeni	0	1200
HFC 152 a	Difluorieteeni	0	140
CO_2	Hiilidioksidi	0	1

Ponnekaasun vaihtumisesta vuonna 1989 seurasi tuotannon alkuvaiheissa laatuongelmia Finnfoam Oy:ssä. Ongelmat johtuivat valmistajan mukaan eristeeltä vaaditusta tiheydestä. Paras puristuslujuus saavutettiin tiheydellä 38 kg/m^3 , kun tilaajan ehdoton vaatimus oli vähintään 40 kg/m^3 . Tiheyden kasvattaminen teki rakenteesta kenno-maisen, kun sen tulisi olla massamainen [27]. Vuonna 1990 Turengin ratapihalle asennetut levyt on todettu laadultaan heikoksi [28].

2.3 Routalevyltä vaaditut ominaisuudet

2.3.1 Yleiset vaatimukset routalevyille

Ruotsalaisten kokemusten mukaan polystyreenistä valmistettujen ratarakenteen routaeristeiden tulee täyttää seuraavat kolme yleisluontoista vaatimusta:

1. Omata riittävä puristuslujuus
 2. Vastustaa veden imeytymistä siten, että lämmöneristävyys ei sen johdosta merkittävästi ajan myötä heikkene
 3. Vastustaa siihen maaperässä kohdistuvien bakteerien, kemikaalien yms. rasituksia.
- [42]

2.3.2 RHK:n nykyiset vaatimukset routalevyille

RAMOn osassa 3 ”Radan rakenne” [39] määritellään routalevyille 40 vuoden käyttöikävaatimus. RHK:n nykyiset vaatimukset routalevymateriaalille ovat seuraavat:

1. Suulakepuristettu polystyreenilevy (XPS)
2. Kuivatiheys vähintään $40 \text{ kg} / \text{m}^3$
3. Puristuslujuus vähintään 450 kPa (ISO 844)
4. Lämmönjohtavuus enintään $0,036 \text{ W/mK}$ (ISO 8301 v. 1991)
5. Pysyvä kokoonpuristuma syklisessä kuormituskokeessa enintään 5 %. [38, 55]

Syklisessä kuormituskokeessa näytelevyä, jonka koko on $400 \times 400 \text{ mm}$, kuormitetaan toistuvasti 4 Hz taajuudella, yhteensä 2×10^6 kertaa. Kokeella on tarkoitus simuloida lukuisista junan akseleiden ylityksistä routalevyyn kohdistuvaa toistuvaa kuormitusta. Minimikuormitus kokeessa on 10 kPa ja maksimikuormitus 200 kPa. Valmistajan tulee osoittaa väsymiskestävyydelle asetettujen vaatimusten täyttyminen yhdestä kappaleesta jokaista alkavaa 2500 m^3 toimituserää kohti. Tarkempi kuvaus tähän asti Suomessa käytössä olleesta koemenettelystä ja -laitteistosta on esitetty lähteessä [47].

Routalevyn mitoille asetetaan seuraavat vaatimukset:

1. Pituus 4000 mm, ylitys max 20 mm, alitus 0 mm
2. Leveys 600 mm (etenemä 540 mm), ylitys max 10 mm, alitus 0 mm
3. Puolipontti 60 mm (40 mm levyt ilman ponttia)
4. Paksuus 40, 60, 80 tai 100 mm. [38, 55]

Levyjen valmistaja veloitetaan suorittamaan tuotannon aikana laadunvalvontaa levyn tiheyden, puristuslujuuden ja mittojen osalta jatkuvana ja muilta osin pistokokeina. Tiheys, mitat ja puristuslujuus tarkastetaan kustakin levypaksuudesta yhdestä levystä jokaisessa valmistustyövuorossa. Tulokset merkitään työvuoron laaduntarkastuspöytäkirjaan, joka toimitetaan tilaajalle. [38, 55]

2.3.3 CEN-normiluonnoksen vaikutus XPS-levyn vaatimuksiin

Valmisteilla olevassa CEN-normissa prEN 13164 [36] määritetään vaatimukset rakennuskohteissa, mm. ratarakenteessa, roudan eristämiseksi käytettävälle suulakepuristetulle polystyreenille. Normissa määrätään testausmenetelmät ja -olosuhteet sekä raja-arvot ja raja-arvojen perusteella muodostetut luokat testattaville ominaisuuksille. Normiluonnoksessa ei kuitenkaan oteta kantaa tiettyyn käyttötarkoitukseen vaadituista luokista. Joidenkin ominaisuuksien osalta luokkarajojen sijasta on asetettu heikoimmat hyväksyttävät arvot. Valmistajan tulee ilmoittaa tuotteensa luokka tiettyjen ominaisuuksien osalta. Valmistaja on vastuussa toimittamalleen tuotteelle ilmoittamiensa luokkavaatimusten täyttymisestä.

Normiluonnoksessa määrätään ominaisuudet (ks. taulukko 2.3), joista valmistajan tulee käyttökohteesta riippumatta ilmoittaa tuotteensa luokka. Nämä ominaisuudet koskevat siten myös ratarakenteessa käytettäviä routaeristeitä. Myös ominaisuuksien testausmenetelmät on määrätty.

Taulukko 2.3. Käyttökohteesta riippumatta testattavat ominaisuudet ja testimenetelmät prEN 13164:n mukaan [36].

Ominaisuus	Testimenetelmä
Lämmönvastus (lämmönjohtavuus)	prEN 12667
Pituus ja leveys	EN 822
Suorakulmaisuus	EN 824
Tasomaisuus	EN 825
Paksuus	EN 823
Dimensioiden pysyvyys tietyissä lämpötila- ja kosteusolosuhteissa	EN 1604
Puristuslujuus tai puristusjännitys 10 %, 5 %, tai 2 % muodonmuutoksella	EN 826
Paloalttius	prEN 13501-1

Näistä lämmönvastukselle ei ole määrätty mitään raja-arvoa. Pituudelle, leveydelle, suorakulmaisuudelle ja tasomaisuudelle sekä dimensioiden pysyvyydelle on asetettu alimmat hyväksyttävät arvot. Paksuudelle ja puristuslujuudelle on annettu tuotteet luokkiin jakavat raja-arvot.

Normiluonnoksessa määrätään lisäksi ne ominaisuudet ja niiden testimenetelmät (ks. taulukko 2.4), joista valmistaja voi halutessaan ilmoittaa tuotteensa luokan. Myös tilaaja voi sisällyttää näitä ominaisuuksia laatuvaatimuksiinsa ja siten edellyttää kohteeseensa soveltuvasta tuotteesta ilmoitettavaksi.

Taulukko 2.4. Käyttökohteesta riippuen mahdollisesti testattavat ominaisuudet ja testimenetelmät prEN 13164:n mukaan [36].

Ominaisuus	Testimenetelmä
Dimensioiden pysyvyys tietyissä olosuhteissa	EN 1604 / EN 1605
Viruma	EN 1606
Vedenimeytyminen	EN 12087 ja EN 12088
Syklisen kuormituksen kestävyys	SP method 2687 ?
Resistanssi jäätymis-sulamissykleille	EN 12091
Vesihöyryn läpäisevyys	EN 12086
Vaarallisten aineiden vapautuminen	?

Normiluonnoksen informatiivisessa liitteessä (Annex D) listataan vielä ominaisuudet (ks. taulukko 2.5), joita valmistaja voi halutessaan ilmoittaa tuotteestaan. Tilaja voi esittää laatuvaatimuksia myös näiden ominaisuuksien osalta.

Taulukko 2.5. Valmistajan valinnan mukaan testattavat ominaisuudet ja testimenetelmät prEN 13164:n mukaan [36].

Ominaisuus	Testimenetelmä
Puristuskimmomoduuli	prEN (TC 88 N675 Rev.)
Taivutuslujuus	EN 12089
Suljettujen ja avointen solujen suhteelliset osuudet	ISO 4590

Tuotteen tilaaja ei voi vaatia normin mukaiselta XPS-tuotteelta normiluonnokseen sisällyttömiä ominaisuuksia, eikä myöskään asettaa normiluonnoksessa säädettyjä raja-arvoja tiukempia vaatimuksia. Tilajalla on luonnollisesti oikeus asettaa käyttö-

kohteeseensa soveltuvalle tuotteelle em. vaatimuksia, mutta tällöin ei voida puhua normin mukaisesta XPS-tuotteesta.

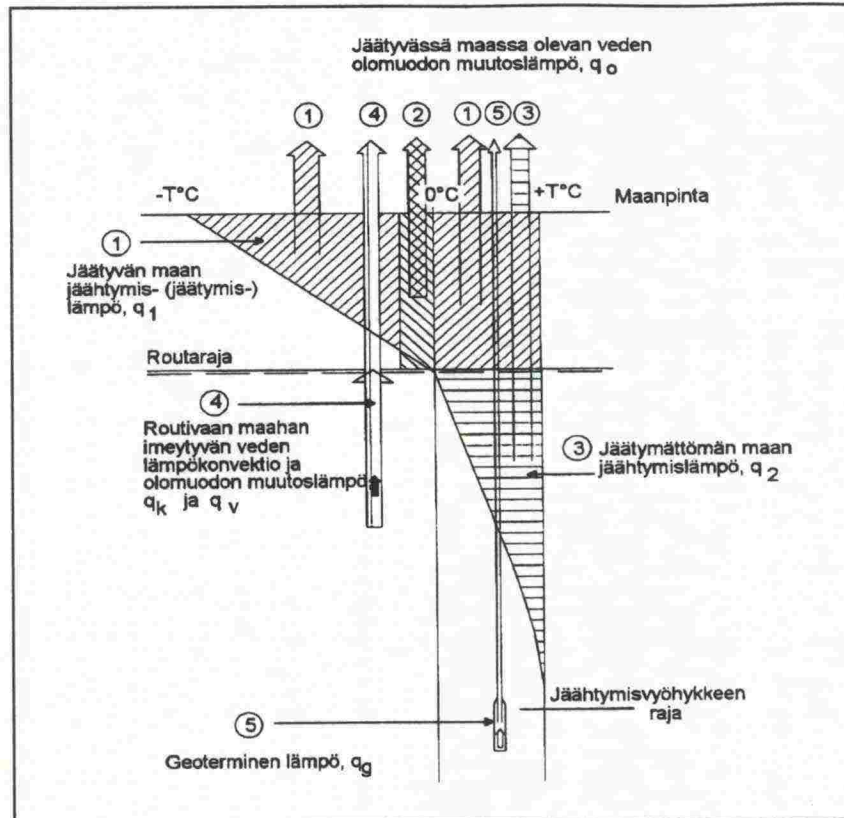
Normiluonnoksessa esitettyjen ominaisuuksien testaus on tuotteen valmistajan tehtävä. Mikäli tilaaja ei suorita omaehtoista tilaamansa tuotteen laadunvalvontaa, hänen on luotettava valmistajan ilmoittamien arvojen paikkansapitävyyteen. Valmistaja on kuitenkin vastuussa tuotteelle ilmoittamiensa luokkarajojen täyttymisestä. Näin ollen on syytä laatia säännöt, joiden mukaan toimitaan, jos tilaajan omassa laadunvalvonnassa havaitaan jollekin ominaisuudelle ilmoitettua heikompi arvo. Tällöin kyseeseen tulee sekä tilaajan että valmistajan hyväksymän ns. kolmannen osapuolen suorittama testaus. Tämän tutkimuksen perusteella luotiin radassa käytettäville XPS-levyille CEN-normiluonnokseen pohjautuvat tekniset toimitusehdot (liite 1).

2.4 Ratarakenteen routamitoitus

2.4.1 Tausta

Maassa jäätymisen aikana tapahtuva lämpövirtaus voidaan jakaa osakomponentteihin vapautuvan lämmön alkuperän mukaan kuvan 2.1 mukaisesti. Lämpövirtauksen osakomponentteja ovat 1) jäätyvän maan jäähtymis- (jäätymis-) lämpö, 2) jäätyvässä maassa olevan veden jäätymislämpö, 3) jäätymättömän maan jäähtymislämpö, 4) jäätyvään maahan imeytyvän veden lämpökonvektio ja jäätymislämpö sekä 5) geotermien lämpö. [12]

Materiaalien lämmönjohtavuudet vaikuttavat oleellisesti routamitoitukseen. Lämmönjohtavuus (λ) ilmoittaa sen lämpömäärän, joka siirtyy aikayksikössä kohtisuorasti pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen ainekerroksen läpi, kun lämpötilaero pintojen välillä on yksikön suuruinen. Yksikkönä käytetään W/Km .



Kuva 2.1. Jäätymisprosessin aikana maasta poistuvan lämpömäärän jakautuminen osakomponentteihin lämmön alkuperän mukaan [12].

Lämmönvastus riippuu ainekerroksen paksuudesta ja lämmönjohtavuudesta. Lämmönvastus (R) ilmoittaa rakenneosan tai ainekerroksen lämmönsiirtymisvastuksen. Yksikkönä käytetään $K\ m^2/W$. Kerroksen i lämmönvastus lasketaan kaavalla: $R_i = d_i/\lambda_i$, missä d_i on kerroksen i paksuus ja λ_i kerroksen i lämmönjohtavuus. [45]

Rakenteen routavastus kuvaa pakkasmäärää, joka tarvitaan jäädyttämään tietyn paksuinen rakenne. Mitoituspakkasmäärän mukaisena talvena ratarakenteen routimatot kerrokset tulee routimisen välttämiseksi mitoittaa sellaiseksi, että niiden yhteenlaskettu routavastus on yhtä suuri kuin mitoittava pakkassumma. Tällöin routaraja ei yllä routivaan pohjamaahan tai penkereeseen eikä ratarakenteessa tapahdu routanousua, jos talven pakkassumma ei ylitä mitoitusarvoa. Routavastuksen ja pakkassumman yksikkönä käytetään yleisimmin $h^\circ C$.

2.4.2 Mitoituksen teoreettinen perusta

Ratarakenteen routamitoituksen perustana on norjalaisen Skaven-Haugin kehittämä empiirisiin mittauksiin sekä roudan syvyys- ja routavastuslaskelmiin pohjautuva menetelmä. Skaven-Haugin menetelmä on edellä esitetystä lämpövirtausmallista sikäli yksinkertaistettu, että siinä ei huomioida jäätyneen maan jäähtymislämpöä.

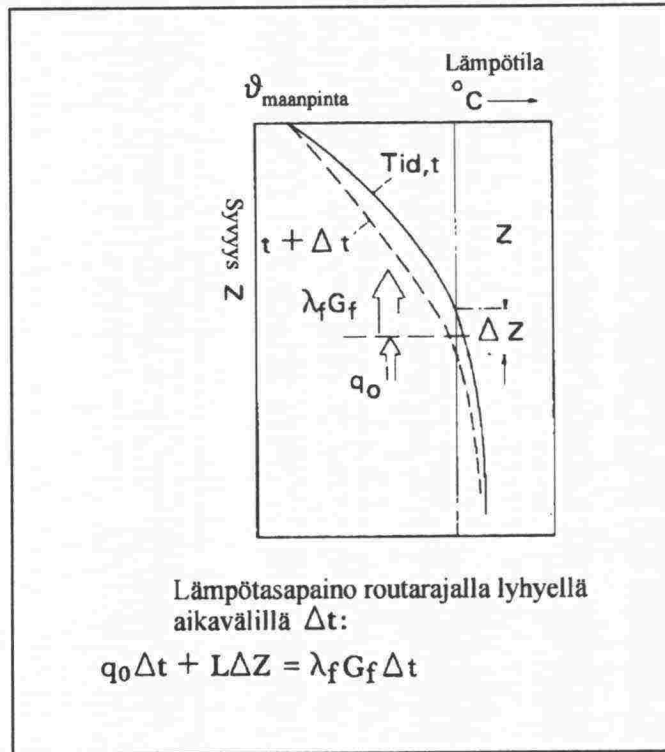
Kuvassa 2.2 on esitetty routarajalla olevan maakerroksen (paksuus = ΔZ) lämpötasapaino lyhyenä aikavälinä Δt . Sulasta maasta routarajan alapuolelta virtaa lämpöä routa-

rajalle (q_0). Tätä lämpöä kutsutaan maalämmöksi. Tarkastellun maakerroksen (ΔZ) sisältämän veden jäätyessä vapautuu veden jäätyislämpöä (L) vastaava määrä lämpöä, joka virtaa routarajalta ylöspäin. Jotta lämpötasapaino olisi voimassa, maakerroksesta (ΔZ) sen yläpuolella olevia kylmempiä maakerroksia kohti virtaavan lämpömäärän on vastattava maalämmön ja jäätyislämmön summaa. Pois virtaava lämpö riippuu routarajan yläpuolisen jäätyneen maan lämmönjohtavuudesta (λ_f) ja lämpötilagradientista (G_f). Täten on voimassa [33]:

jäätyislämpö + maalämpö = pois virtaava lämpö, eli:

$$L \cdot dZ + q_0 \cdot dt = \lambda_f \cdot G_f \cdot dt, \quad Wh / m^2, \text{ missä} \quad (1)$$

- L = $w \cdot \rho_d \cdot l$ = tilavuusjäätyislämpö, Wh / m^3
 w = vesipitoisuus, *paino-osina*
 ρ_d = kuivatiheys, kg/m^3
 l = veden jäätyislämpö = $93 Wh/kg$
 q_0 = lämpövirta sulasta maasta, W/m^2
 λ_f = jäätyneen maan lämmönjohtavuus, W/Km
 G_f = lämpötilagradientti routarajalta maan pintaan, $^{\circ}C/m$
 t = aika, h



Kuva 2.2. Lämpötasapaino routarajalla lyhyenä aikavälinä Δt [33].

Integroimalla kaava (1) käsittämään koko pakkassummaa kerryttävä aika saadaan homogeenisessa maa-aineksessa [33]:

$$\Omega + E = F_{\text{maapinta}} , \quad h^{\circ}C , \quad \text{missä} \quad (2)$$

Ω = jäätymisvastus maan sisältämän veden jäätymislämmöstä
 E = jäätymisvastus sulasta maasta virtaavasta maalämmöstä
 F_{maapinta} = pakkassumma maanpinnassa

Kaavan termit auki kirjoitettuna saadaan [33]:

$$\frac{L}{\lambda_f} \cdot \frac{Z_{\max}^2}{2} + Wt \cdot \frac{Z_{\max}}{\lambda_f} \cdot Q_0 = F_{\text{maapinta}} , \quad h^{\circ}C , \quad \text{missä} \quad (3)$$

Z_{\max} = roudansyvyys, m
 Wt = Watzingerin luku, empiirinen maalajista riippuva korjauskerroin
 Q_0 = routarajalle koko pakkaskauden aikana virtaava kokonaismaalämpö,
 Wh/m^2
 Z_{\max}/λ_f = R_{\max} = lämmönvastus suurimmalla roudan syvyydellä (Z_{\max}), $m^2 K/W$

Roudansyvyys (Z_{\max}) on määritettävissä kaavasta (3), ja siten on mahdollista mitoittaa paksuus, joka vaaditaan routimisen ehkäisemiseksi routivan maalajin päällä olevalta routimattomalta homogeeniselta maakerrokselta. Watzingerin luku on riippuvainen roudansyvyydestä (Z_{\max}). Tästä syystä mitoittettavaa kerrospaksuutta joudutaan haaru-koimaan arvioimalla roudansyvyydelle aluksi jokin arvo, jonka jälkeen mitoittettava paksuus voidaan ratkaista graafisesti.

Koska sulasta maasta virtaava maalämpö (E) lasketaan kaavan (3) mukaisesti routarajalle virtaavan kokonaismaalämmön (Q_0) ja empiirisiin kokeisiin perustuvan Watzingerin luvun (Wt) perusteella, voidaan todeta, että termi E sisältää kuvassa 2.1 esitetystä lämpövirtausmallista jäätymättömän maan jäätymislämmön lisäksi routivaan maahan imeytyvän veden lämpökonvektion, olomuodon muutoslämmön ja geotermisen lämmön.

Sellaisessa rakenteessa kuten radassa, jossa on useita vesipitoisuudeltaan ja lämmönjohtavuudeltaan vaihtelevia kerroksia, kunkin kerroksen jäätymislämpö (L_i) tulee laskea erikseen ottamalla kyseisen kerroksen vesipitoisuus huomioon. Lisäksi jäätyneen maan lämmönjohtavuus (λ_i) vaihtelee kerrosmateriaalin ja sen kosteuden mukaan. Näin ollen kerroksellisessa rakenteessa pätee [33]:

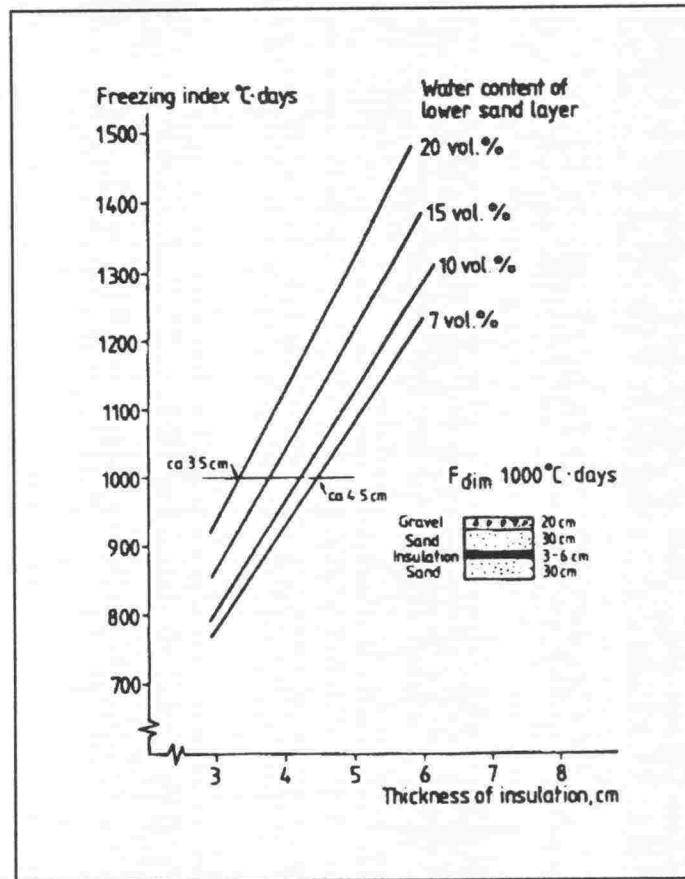
$$\sum_{i=1}^n \left\{ L_i \cdot \Delta Z_i \cdot \left(\frac{\Delta Z_i}{2\lambda_i} + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\Delta Z_j}{\lambda_j} \right) \right\} + Wt \cdot Q_0 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta Z_i}{\lambda_i} = F_{\text{maapinta}} , \quad h^{\circ}C , \quad \text{missä} \quad (4)$$

λ_i = kerroksen i lämmönjohtavuus
 ΔZ_i = kerroksen i jäätynyt paksuus
 $\Delta Z_i / \lambda_i$ = R_i = kerroksen i lämmönvastus

Kaavan (4) avulla tietyn kerroksen paksuus voidaan mitoittaa rakenteessa sellaiseksi, että routaraja ei yllä routivaan maakerrokseen [33]. Mitoituksen luotettavuus riippuu

siitä, kuinka tarkasti vallitsevat ilmasto- ja materiaaliominaisuudet pystytään esittämään, sillä materiaalin lämmönjohtavuus on sidoksissa sen kosteuteen samoin kuin Watzingerin luku (Wt) ja kokonaismaalämpö (Q_0) ilmasto-olosuhteisiin.

Eristelevyn alla olevan hiekan kosteuspitoisuuden vaikutus tierakenteen routavastukseen on esitetty kuvassa 2.3. Taulukossa 2.6 on kuvattu radan tukikerroksen ja eristelevyn alla olevan sorakerroksen kosteuspitoisuuden vaikutusta mitoitetavan sorakerroksen paksuuteen. Kuvasta 2.3 ja taulukosta 2.6 on nähtävissä, että eristelevyn alla olevan maan kosteus kasvattaa routavastusta. Tämä on seurausta kosteuden myötä kasvavasta maan jäätymislämmöstä. Tukikerroksessa kosteus vaikuttaa routavastukseen päinvastaisesti, koska kosteuden myötä kerroksen lämmönjohtavuus suurenee, mikä helpottaa maalämmön poistumista.



Kuva 2.3. Tierakenteen routavastuksen riippuvuus eristelevyn alla olevan hiekkakerroksen kosteuspitoisuudesta eri eristelevypaksuuksilla [16].

Taulukko 2.6. Tukikerroksen ja 5 cm eristelevyn alapuolella olevan sorakerroksen kosteuspitoisuuden vaikutus mitoittettavan sorakerroksen paksuuteen. Pakkassumma esimerkissä on 35000 °C ja vuoden keskilämpötila 2 °C [20].

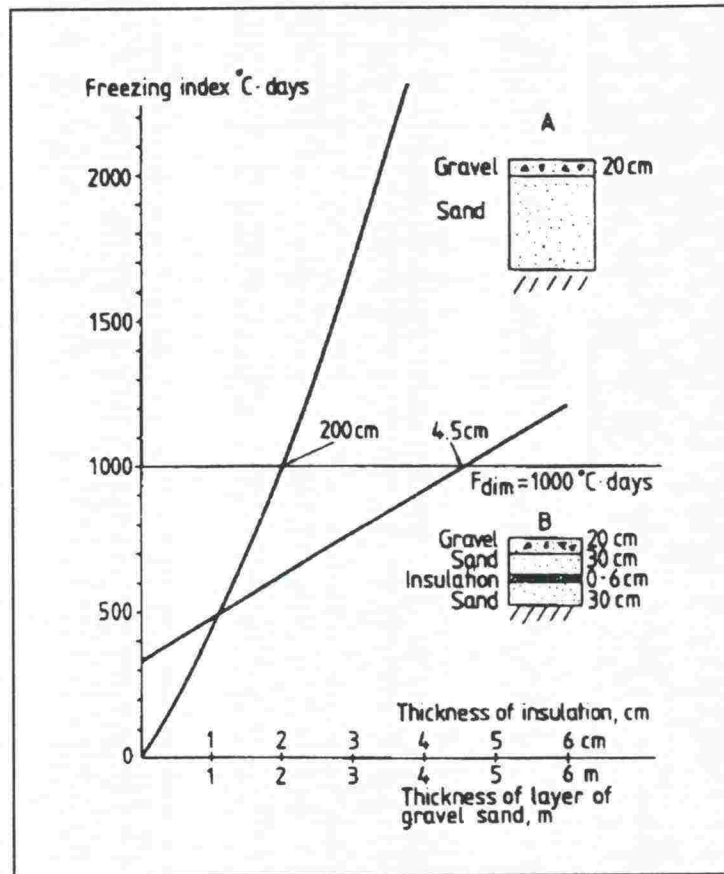
		Tukikerroksen kosteuspitoisuus (paino %)		
		1 %	2 %	3 %
Soraa Kosteuspitoisuus (paino %)	2 %	Z = 40 cm	Z = 48 cm	Z = 59 cm
	5 %	Z = 23 cm	Z = 28 cm	Z = 36 cm
	8 %	Z = 18 cm	Z = 20 cm	Z = 39 cm

Routaeristeiden käyttö perustuu maalämmön hyödyntämiseen. Eristämättömässä radassa maahan kesäkaudella varastoitunut lämpö on jo talvikauden alkaessa virrannut pois. Routalevyn ansiosta lämpövirta pienenee ja eristeen alapuolisessa maassa säilyy suurempi lämpömäärä vastustamassa maan jäätymistä talvikaudella. Kaavassa (4) routalevyn vaikutus ilmenee routalevykerroksen alhaisena lämmönjohtavuutena (λ_i), josta seuraa maamateriaaliin nähden huomattavasti suurempi kerroksen lämmönvastus (R_i) jo pienelläkin levypaksuudella (ΔZ_i). Näin ollen maalämmön pois virtaaminen vaikeutuu ja maalämmön aikaansaama jäätymisvastus (kaava 2, termi E) lisääntyy. Taulukossa 2.7 esitettyjen lämmönjohtavuusarvojen perusteella voidaan todeta, että maamateriaalien lämmönjohtavuus on kosteuspitoisuudesta riippuen 30-100-kertainen kuivan eristelevyn lämmönjohtavuuteen verrattuna.

Taulukko 2.7. Eri maamateriaalien ja eristelevyn lämmönjohtavuuksia [33].

Materiaali	w	$\lambda_{jäätynyt}$ (W/Km)	λ_{kuiva} (W/Km)
Sora	2...6 p. %	0,7...1,8	1,0...2,0
Siltti	10...30 p. %	1,7...2,8	1,0...1,7
Savi	20...40 p. %	1,6...2,4	0,9...1,4
XPS-routalevy	0...5 til. %	0,025-0,50	0,025...0,050

Eristelevyn rakenteen routavastusta lisäävä vaikutus käy ilmi kuvasta 2.4 [16]. Kuvasta nähdään, kuinka routaeristeen merkitys korostuu, kun rakenteelta vaaditaan suurempaa routavastusta. 1000 astepäivän (= 24000 h°C) routavastukseen edellytetään 200 cm hiekkakerrosta. Sama routavastus saavutetaan asentamalla 30 cm hiekkakerrosten väliin 4,5 cm eristelevy.



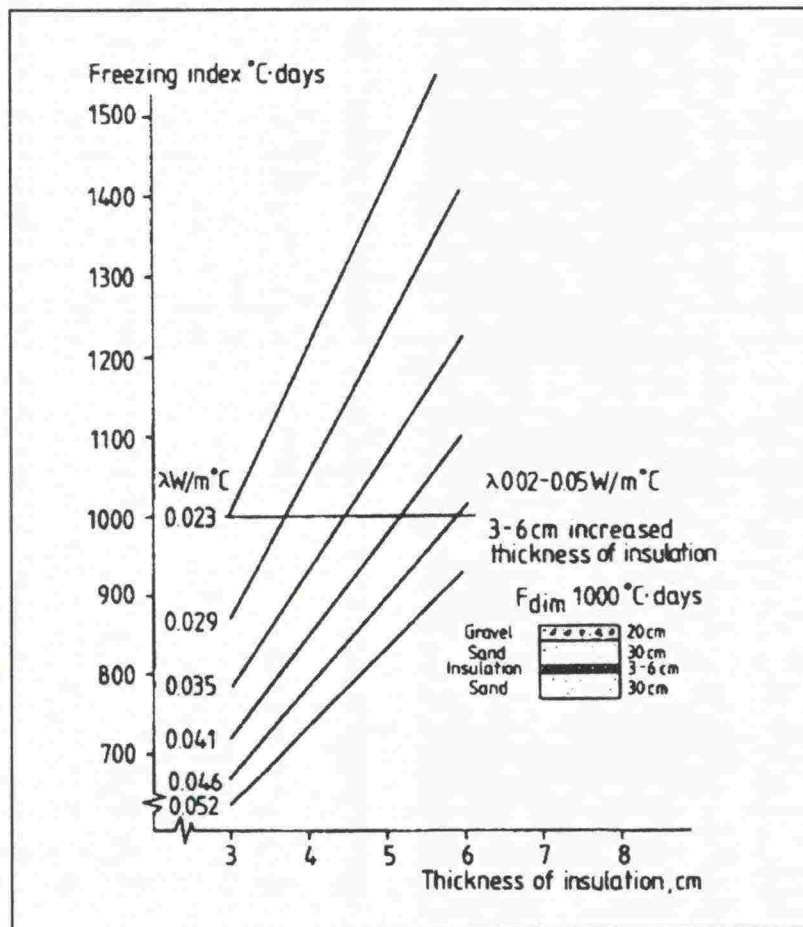
Kuva 2.4 Laskennallinen esimerkki 30 cm hiekkakerrosten väliin sijoitetun kuivan routalevyn ja vastaavasti eristämättömän rakenteen hiekkakerroksen mitoituksesta eri pakkasmäärillä [16].

2.4.3 Routalevyn mitoitus

Routalevy mitoitetaan kaavan (4) avulla. Kuten kaavasta käy ilmi, eristelevyn lämmönjohtavuuden lisäksi levyn paksuus vaikuttaa levyn lämmönvastukseen (R_l) ja sitä kautta rakenteen routavastukseen. Levyn paksuuden kaksinkertaistaminen kaksinkertaistaa levyn lämmönvastuksen. Levyn paksuuden vaikutus koko rakenteen routavastukseen ei ole yhtä yksiselitteinen, sillä muutos levyn paksuudessa vaikuttaa kaavassa (4) myös termeihin Wt ja Q_0 . Kuinka merkittävä levyn paksuuden lisääminen on rakenteen routavastuksen kannalta, riippuu jossain määrin myös rakenteessa olevien maakerrosten paksuudesta ja kosteuspitoisuudesta. Lopullista levyn paksuutta valittaessa routalevyn mitoituksessa saatuun levypaksuuteen lisätään 10 mm kompensoimaan sepelirakeiden painautumista levyn pintaan [33].

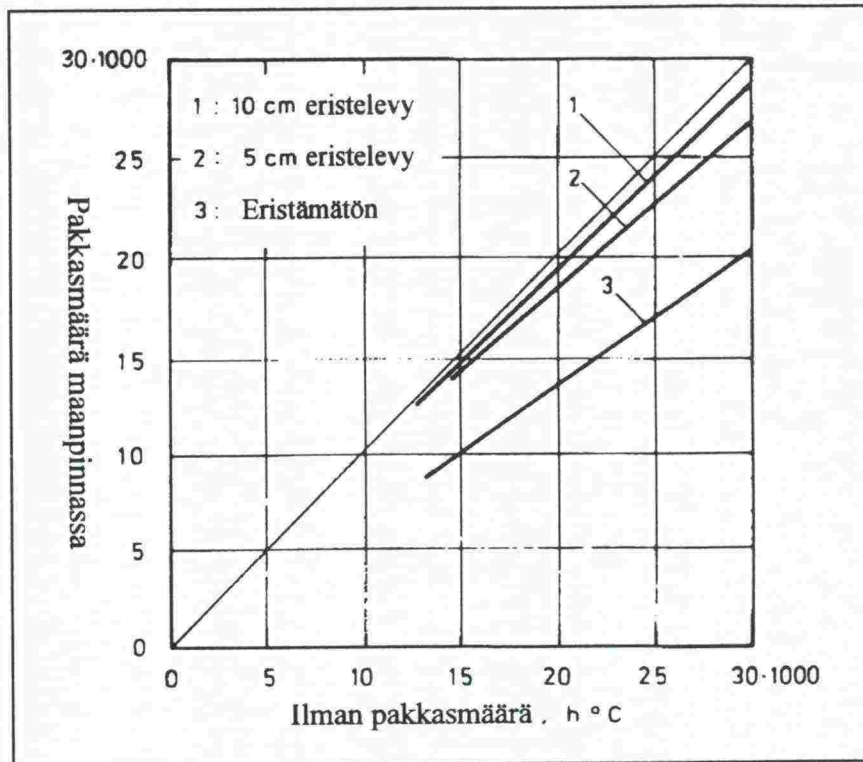
Routalevyn mitoittavana lämmönjohtavuutena käytetään arvoa $0,037 \text{ W/Km}$, jonka oletetaan vastaavan XPS-levyn lämmönjohtavuutta noin 5-10 til.% vesipitoisuudella [33]. HCFC-kaasulla paisutetun Finnfoam-eristyslevyn tyyppihyväksyntäpäätöksessä [56] maakerrosten välissä routaeristeenä käytettävän tuotteen normaalin lämmönjohtavuus hyväksyttiin arvoksi $0,041 \text{ W/Km}$. Vuosina 1999 ja 2000 valmistetuille CO₂-lla paisutetuille Finnfoam-levyille vastaava tyyppihyväksytty arvo on $0,045 \text{ W/Km}$.

Uusimmassa, 15.12.2000 voimaan tullessa Finnfoam-eristelevyjen tyyppihyväksyntäpäätöksessä pelkällä CO₂:lla paisutetun Finnfoam-levyn normaalin lämmönjohtavuus on hyväksytty arvoksi 0,041 W/Km ja HFC-134 apuonnekasua sisältävälle levyille arvoksi 0,037 W/Km. Talonrakennuksen routasuojausohjeissa [46] tiheydeltään 40 kg/m³ XPS-levyn mitoituslämmönjohtavuudeksi annetaan ankarissa olosuhteissa 0,039-0,041 W/Km ja hyvissä olosuhteissa 0,036-0,037. Eristelevyn lämmönjohtavuuden vaikutus rakenteen routavastukseen käy ilmi kuvasta 2.5 [16]. Kuvasta voidaan todeta, että lämmönjohtavuuden ollessa 0,041 W/Km vaaditaan 1000 astepäivän (= 24000 h°C) routavastuksen saavuttamiseksi noin 20 % paksumpi eristelevy verrattuna tilanteeseen, jossa eristeen lämmönjohtavuus on 0,035 W/Km.



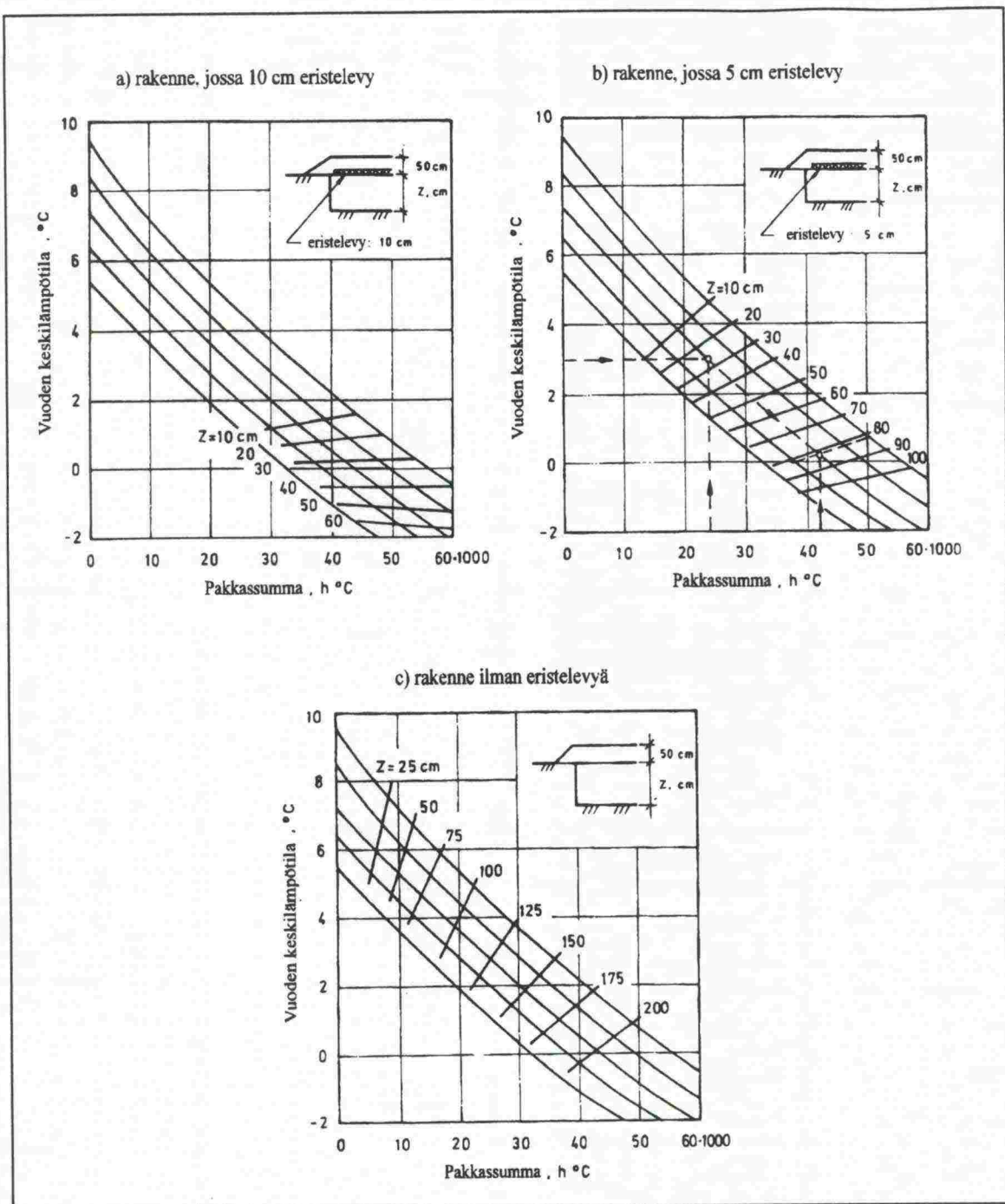
Kuva 2.5. Routalevyllä eristetyn tierakenteen routavastus eristelevyn eri lämmönjohtavuuksilla levyn paksuuden funktiona [16].

Norjan rautateillä routalevyn mitoituksessa on käytössä Skaven-Haugin osittain empiirisestä menetelmästä mallinnustulosten perusteella muunnettu versio. Tietokone-mallinnusten mukaan maanpinnan pakkasumma routalevyllä eristetyssä rakenteessa on likimain sama kuin ilman pakkasumma, kun taas eristämättömässä rakenteessa maanpinnan pakkasumma on pienempi kuin ilman pakkasumma johtuen maanpinnalle virtaavasta lämmöstä, jota eristelevy em. tapauksessa pienentää (ks. kuva 2.6). Tästä syystä Norjassa routamitoituksessa käytetään kerran 100 vuodessa toistuvaa (ilman) pakkasummaa routalevyillä eristettävässä rakenteessa ja kerran 10 vuodessa toistuvaa pakkasummaa eristämättömässä rakenteessa.



Kuva 2.6. Ilman pakkassumman ja 5 cm lumikerroksen alla olevan maanpinnan pakkassumman vertailu kun rakenteessa on 1) 10 cm eristelevy, 2) 5 cm eristelevy ja 3) kun rakenne on eristämätön [20].

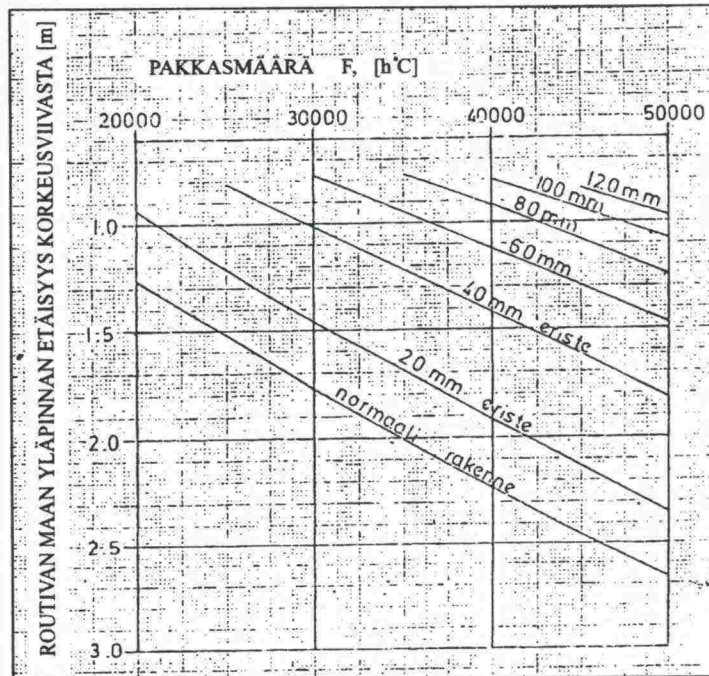
Kenttätutkimusten ja mallinnuksen perusteella keskimääräiseksi kosteuspitoisuudeksi sulalle tukikerrossepelille on saatu noin 2 painoprosenttia ja jäätyneelle 10 painoprosenttia sekä routalevyn alla olevalle soralle noin 5 painoprosenttia. Näitä arvoja on käytetty Norjan rautateiden mitoitusunomogrammien (ks. kuva 2.7) laadinnassa. Norjassa on käytössä kaksi eristelevypaksuutta, 5 cm ja 10 cm, joiden alla olevan sorakerroksen paksuudelle sekä sorakerrokselle ilman routalevyä nomogrammit on laadittu. Nomogrammeissa kuvataan ilmasto-oloja pakkassumman (F_{10} ja F_{100}) lisäksi vuoden keskilämpötilalla.



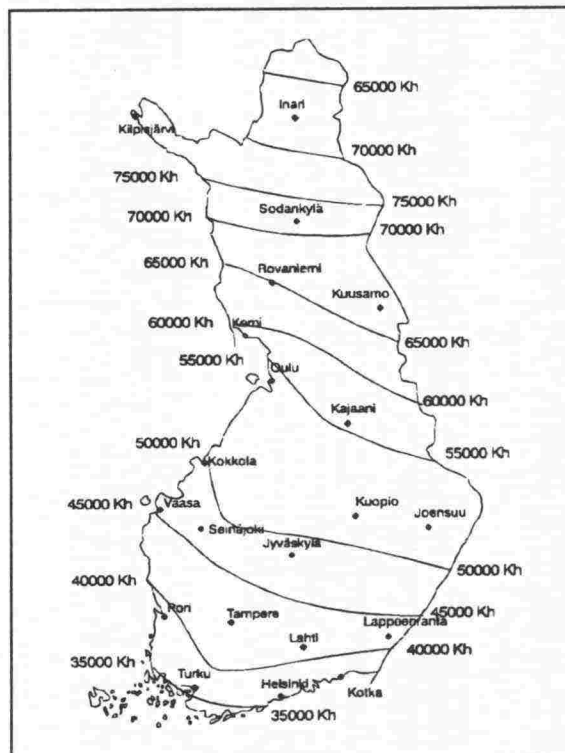
Kuva 2.7. Norjan rautateiden mitoitusnomogrammi a) 10 cm paksun routalevyn alla olevan sorakerroksen paksuudelle, b) 5 cm paksun routalevyn alla olevan sorakerroksen paksuudelle, c) sorakerroksen paksuudelle eristämättömässä rakenteessa. Nomogrammien käyttö: Määritetään ensin alueen keskimääräinen pakkasmäärä ja vuoden keskilämpötilan leikkauspiste. Tämän jälkeen siirrytään nomogrammin käyrän suuntaisesti, kunnes saavutetaan kerran 100 (a ja b) vuodessa toistuva pakkasmäärä, tai kerran 10 (c) vuodessa toistuva pakkasmäärä. Se Z-arvo, johon päädytään, kertoo vaaditun routimattoman alusrakennepaksuuden. [20]

Myös Suomen rautateillä käytössä oleva eristelevyn mitoitusnomogrammi (ks. kuva 2.8) on laadittu Skaven-Haugin menetelmän pohjalta. Routalevyn paksuuden mitoitus perustuu routivan maan yläpinnan etäisyyteen korkeusviivasta sekä tilastollisesti kerran 50 vuodessa toistuvaan pakkasmäärään (kuva 2.9). RHK:n vaatimusten mukaan routalevyn alla olevan eristekerroksen paksuuden on oltava vähintään 300 mm [38]. Tällöin

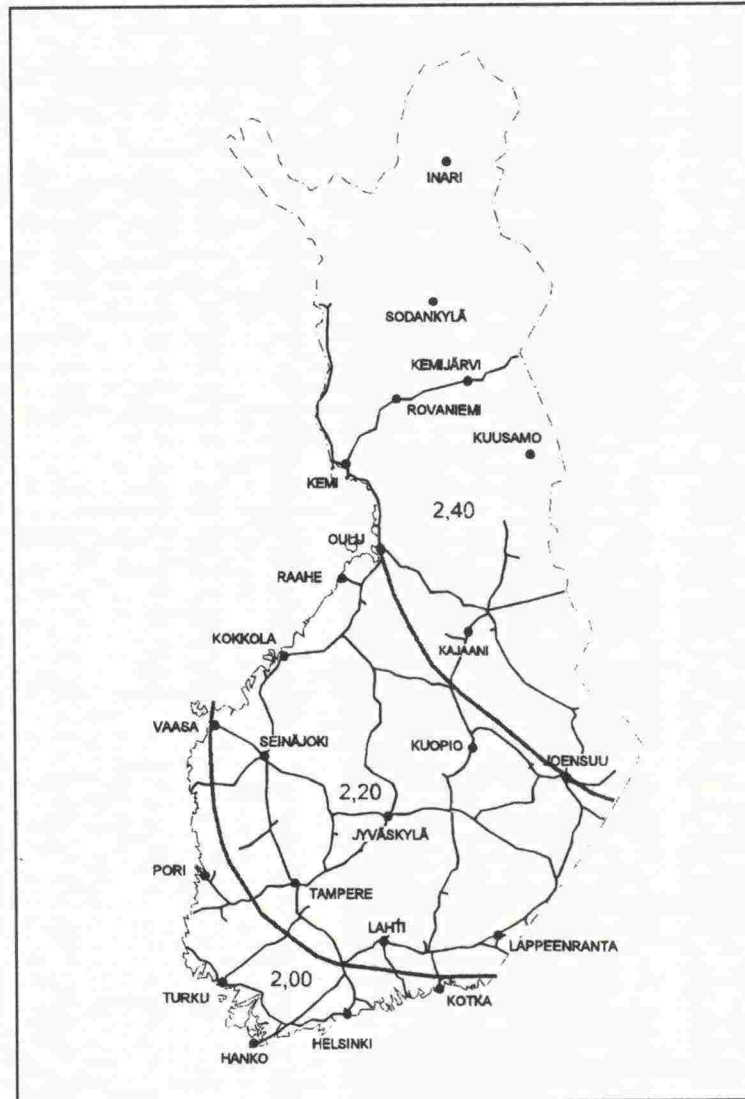
routivan maan yläpinnan etäisyydeksi korkeusviivaan muodostuu vähintään 0,9 metriä. Kuvasta 2.10 nähdään routimattomalta radalta vaadittu rakennekerrosten paksuus silloin, kun eristelevyä ei käytetä.



Kuva 2.8. Eristelevyn paksuuden mitoitusnomogrammi [52].

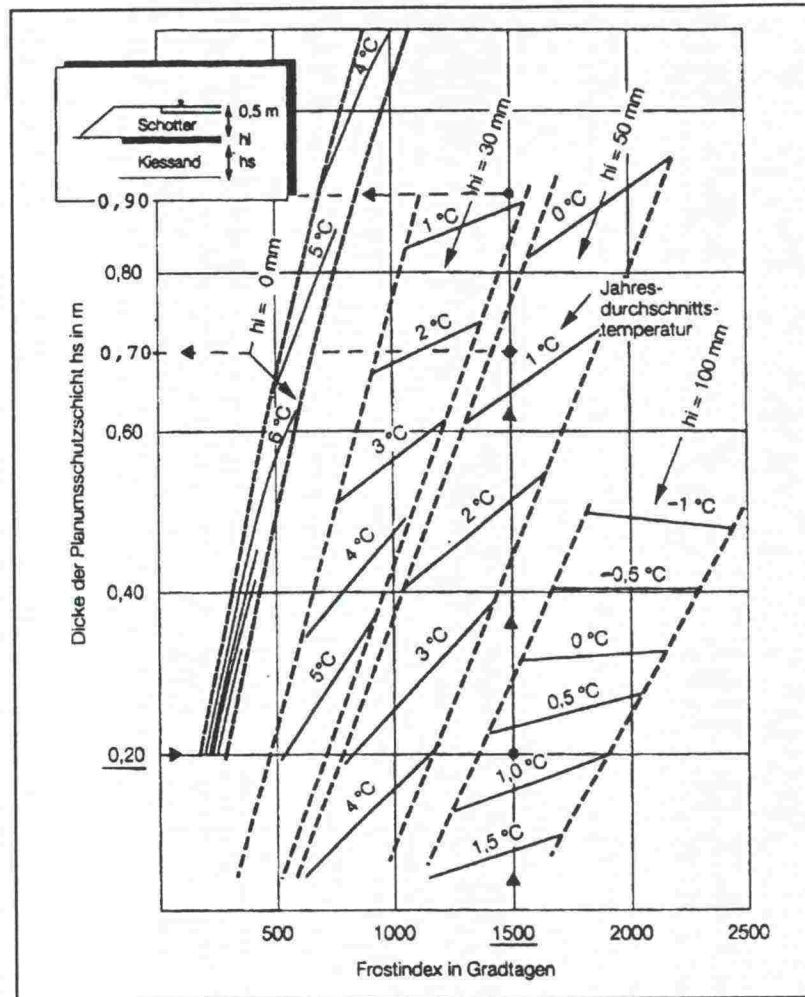


Kuva 2.9. Tilastollisesti kerran 50 vuodessa toistuva pakkasmäärä F_{50} , $h^{\circ}C$ [46].



Kuva 2.10. Routimattoman radan rakennekerrosten paksuus [39].

Saksalaisen materiaalivalmistaja Basf AG:n ohjeessa [5] esitetään UIC CODE 719 R:ään [51] pohjautuva routalevyn paksuuden mitoitusnomogrammi (ks. kuva 2.11). Erona Suomessa käytettävään nomogrammiin on se, että ilmasto-olosuhteita kuvataan pakkassumman lisäksi vuotuisella keskilämpötilalla. Lisäksi kuvan 2.11 nomogrammissa routalevyllä on kolme paksuusvaihtoehtoa eli 30, 50 ja 100 mm.



Kuva 2.11. Basf AG:n ohjeessa esitetty routalevyn mitoitusnomogrammi ratarakenteessa [51].

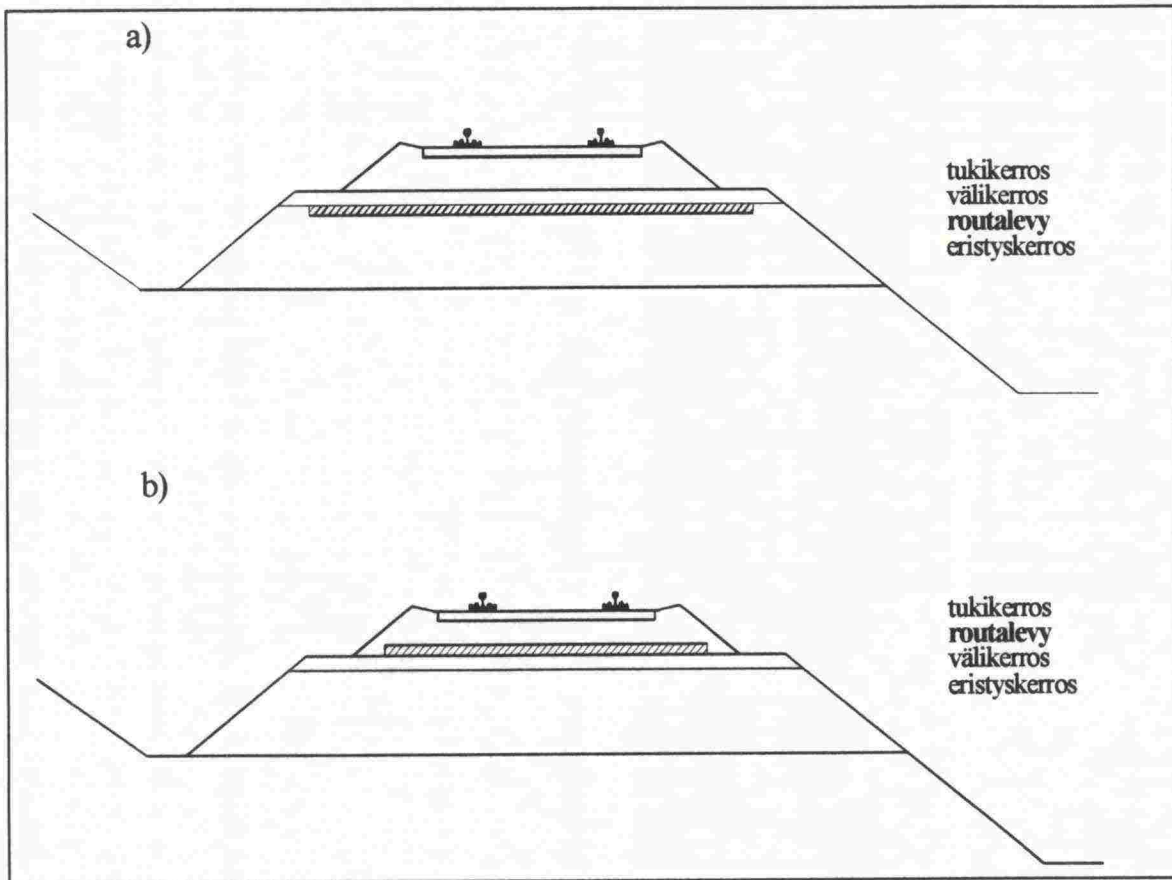
2.5 Routalevyjen asennus

2.5.1 Asennustavat

Routalevyjä asennetaan kahdella tavalla. Tavoiteltava asennustapa on sijoittaa levy välikerroksen alapuolelle (ks. kuva 2.12 a) [38], jolloin se on suojassa särmikkäiltä sepelirakeilta. Tämä asennustapa on mahdollinen vain uutta rataa rakennettaessa tai silloin, kun levyjä asennettaessa raide-elementit on väliaikaisesti poistettu kuten esimerkiksi vaihtenvaihdossa.

Pääosa routalevyistä asennetaan kuitenkin raidesepelin seulonnan yhteydessä välittömästi tukikerroksen alla olevan välikerroksen päälle (ks. kuva 2.12 b), jolloin suoja-hiekkakerrosten tekeminen nykyisin käytössä olevilla sepelinpuhdistuskoneilla on mahdotonta niin levyn ylä- kuin alapuolellekin. Sen vuoksi tällä tavoin asennettujen eristelevyjen päällä on kokeiltu erityyppisiä suojalevyjä. Vuorivillalevyjä kokeiltiin suojalevyinä 1970-luvulla, mutta ne todettiin tarkoitukseen sopimattomiksi sepelirakeiden painuessa suojalevystä huolimatta eristelevyyn. Lisäksi todettiin, että vuorivillalevyt vettyvät suuressa määrin ja lisäävät siten myös eristelevyjen kosteus-

pitoisuutta. Myöhemmin käytettiin yli 140 g/m^2 painavaa suodatinkangasta, joka sopi paremmin tarkoitukseen [29].



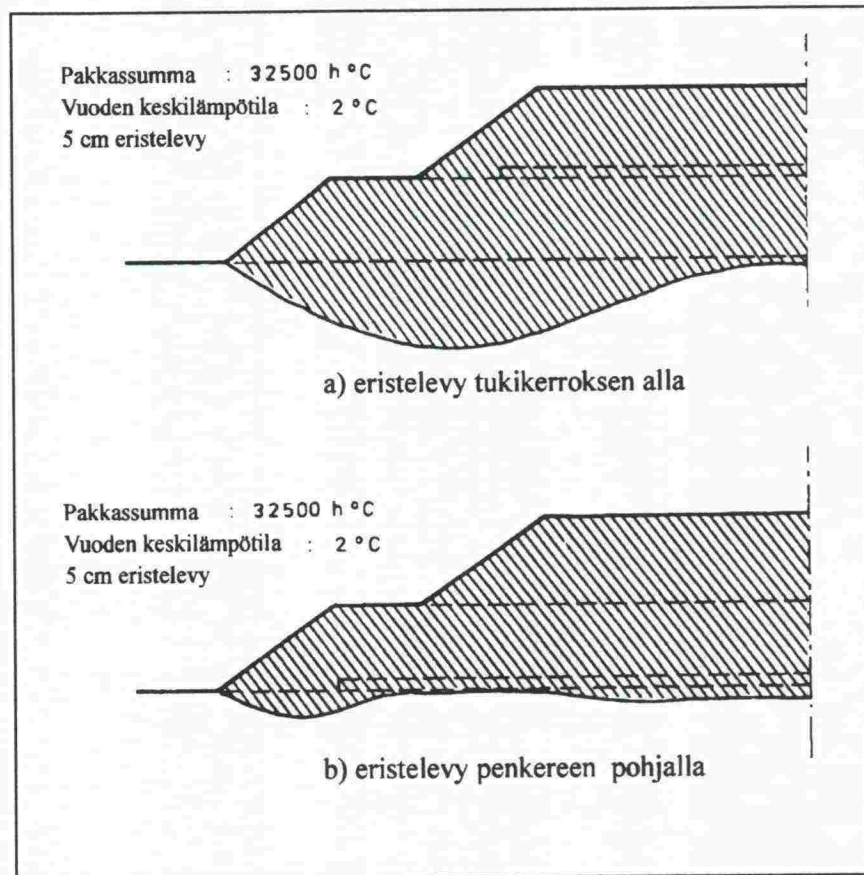
Kuva 2.12. Routalevyjen asennustavat. a) Routalevy välikerroksen alla ja b) routalevy välikerroksen päällä.

Vuonna 1990 toteutettiin Turengin ratapihalla routalevykokeilu [28], jossa tutkittiin routalevyjen asennussyvyyden ja suojauksen vaikutusta levyn vaurioitumiseen. Tutkimuksessa todettiin, että soralla tai geotekstiilillä suojatun eristelevyn asennussyvyydeksi (levyn yläpinnan etäisyydeksi korkeusviivasta) voitaisiin sallia 45 cm. Vastaavasti suojaamaton levy tulisi asentaa vähintään 55 cm syvyyteen korkeusviivasta. Tukemisen ei todettu vaurioittavan suojattua levyjä, jos asennussyvyys on yli 40 cm. Tulosten perusteella eristelevyn suojauksessa päätettiin ryhtyä käyttämään levyn päälle asennettavaa geotekstiiliä. Laminointityö osoittautui valmistusvaiheessa kuitenkin huomattavan kalliiksi [28]. Tarjouksen perusteella esimerkiksi paksuudeltaan 100 mm levyn toiselle pinnalle liimattu suodatinkangas olisi lisännyt hankintakustannuksia lähes 30 % ja molempiin pintoihin liimattuna vastaavasti lähes 60 % [14]. Toisaalta geotekstiilin asentaminen eristelevyyn asennusvaiheessa on erittäin hankalaa.

Näin päädyttiin kiristämään levyiltä vaadittuja ominaisuuksia, jotta eristelevyt voidaan asentaa ilman suojausta. Nykyisin voimassa olevien ohjeiden [37] mukaan sepelin seulonnan yhteydessä ilman suojausta asennettavien levyjen yläpinnan etäisyys korkeusviivasta on oltava vähintään 55 cm. Kaivupohjan tasaisuus tarkastetaan ja levyn rikkoutumisvaaraa aiheuttavat sepelirakeet poistetaan ennen levyjen asentamista. Tämä

on erityisen tärkeää, sillä mm. Mustonen [28] on todennut tasaisen asennusalan vähentävän huomattavasti routalevyn vaurioitumista. Asennuksessa on lisäksi otettava huomioon, että raidetta tuettaessa raiteen tulee olla niin korkealla, että tuentahakkujen ja routalevyn yläpinnan väliin jää aina vähintään 10 cm. Suojahiekan puuttuminen kompensoidaan levyä mitoitettaessa levyn lisäpaksuudella, joka on 10 mm [37]. Saksassa käytössä oleva PM 200 sepelinpuhdistuskone mahdollistaa myös suojahiekkakerroksen tekemisen routalevyn ja tukikerroksen väliin [18].

Asennettaessa routalevyjä penkereeseen routa pääsee norjalaisten tietokonemallinnusten [20] mukaan tunkeutumaan rakenteeseen myös penkereen sivuilta. Routa ulottuu tukikerroksen alle asennetun routalevyn päissä syvemmälle kuin keskellä kuvan 2.13 a) mukaisesti. Etenkin penkereessä routalevy olisikin tehokkaampaa sijoittaa syvemmälle rakenteeseen ja ulottaa ainakin metrin normaalitilannetta leveämmälle kuvan 2.13 b) mukaisesti.



Kuva 2.13. a) Kaksiulotteinen roudan syvyyden mallinnus penkereessä, jossa routalevy sijaitsee tukikerroksen alla. Viivoitettu alue kuvaa mallinnettua suurinta roudan tunkeutumisaluetta. Alin katkoviiva vastaa pelkästään pystysuuntaisella routamallilla saatua roudan syvyyttä. b) Routalevy alusrakenteen pohjalla. Mallinnuksessa käytetystä lumen paksuudesta ei lähteessä ole mainintaa. [20]

2.5.2 Asennetut levymäärät ja levyvalmistajat

Polystyreenieristeiden käyttö ratarakenteessa aloitettiin Suomessa vuonna 1970. Tuolloin käyttökokemukset polystyreenin käytöstä olivat vähäiset eri maiden rautatie-yhtiöissä. 1970-luvulla routaeristeeksi asennettiin pääosin EPS-levyjä. Vuonna 1971 perustettiin Riihimäen lähistölle koealue, jonne asennettiin myös XPS-levyjä. Vuonna 1980 koealueelta otettiin näytteitä, joista määritettiin lämmönjohtavuus. Tulosten perusteella EPS-levyjen lämmönjohtavuus oli kasvanut huomattavasti alkuperäisestä, kun taas XPS-levyjen lämmönjohtavuudessa ei ollut tapahtunut merkittävää muutosta. Tämä johtui EPS-levyihin imeytyneestä moninkertaisesta kosteuspitoisuudesta. Tästä syystä radan eristämiseen on vuodesta 1981 alkaen käytetty ainoastaan suulake-puristettuja polystyreenilevyjä. Taulukossa 2.8 on esitetty EPS-levyjen asennusmäärät. [30]

Suomen rautateille on asennettu kolmen materiaalivalmistajan XPS-levyjä. 1980-luvulla asennettiin lähes ainoastaan Finnfoam Oy:n (myöh. Finnfoam) valmistamia levyjä. Muut levytoimittajat ovat saksalainen Basf AG (myöh. Basf) ja ruotsalainen Dow Sverige AB (myöh. Dow). Ulkomaisten valmistajien levyjä on asennettu etenkin 1990-luvulla, jolloin myös asennusmäärät ovat olleet suurempia. Taulukossa 2.9 on tiedot eri vuosina 1980- ja 1990-luvulla hankittujen XPS-levyjen valmistajista ja hankintamääristä.

Taulukko 2.8. EPS-routalevyjen asennusmäärät eri vuosina [30].

EPS-levyjä:	
Vuosi	Raide km
1971	32,0
1972	39,0
1973	28,2
1974	14,6
1975	19,7
1976	13,0
1977	9,5
1978	1,0
1979	21,0
1980	18,2
Yhteensä 1971-1980:	196,2

Taulukko 2.9. Vuosittain hankittujen XPS-routalevyjen valmistajat ja hankintamäärät. Hankintamäärätiedot vuosien 1981 ja 1982 osalta perustuvat lähteeseen [30]. Vuosien 1983-1990 asennusmäärätiedot ovat peräisin lähteestä [28], jossa on ristiriitaisuus levyjen tilavuuden (m^3) ja asennettujen raidekilometrien välillä. Taulukossa olevat luvut perustuvat oletukseen, että lähteessä ilmoitettu levyjen tilavuus on oikein. 1990-luvun osalta tiedot perustuvat eristysuunnitelmien pohjalta tehtyihin puitesopimuksiin, joten todellisten hankintamäärien poikkeamat esitetyistä määristä ovat mahdollisia. Poikkeamat voivat olla melko huomattaviakin, sillä esimerkiksi lähteen [28] tarkasti eritelty tieto vuoden 1991 asennusmäärästä on noin neljänneksen puitesopimuksen mukaista määrää pienempi. Hankintamäärää vastaava eristetty raidepituus on laskettu oletuksella, että eristelevymenekki on $320 m^3 / raidekilometri$, mikä vastaa menekkiä käytettäessä paksuudeltaan 80 mm eristelevyä. Myös asennettujen levyjen valmistajatiedot ovat 1980-luvun osalta epävarmoja.

XPS- levyjä:					
Vuosi	Levyvalmistaja			Hankittu m^3	Raidekm
	Finnfoam	Basf	Dow		
1981		X			14,5
1982		?	?		4,7
1983	X			67 500 (keskimäärin $11\,300 m^3 / a$)	211 (keskimäärin $35 km / a$)
1984	X				
1985			X		
1986	X				
1987	X		X		
1988	X			18 500 (keskimäärin $9\,300 m^3 / a$)	58 (keskimäärin $29 km / a$)
1989	X				
1990	X				
1991		X	X	10 000	31
1992			X	10 000	31
1993		X		40 000	125
1994	X	X		20 000	63
1995			X	20 000	63
1996	X	X		30 000	94
1997	X	X		10 000	31
1998	X	X	X	50 000	156
1999	X	X		45 000	141
2000	X			10 000	31
Yhteensä 1981-2000:				337 000	1054

3 RADAN KUORMITUSYMPÄRISTÖN VAIKUTUS XPS-ROUTA-LEVYYN

3.1 Yleistä

Routalevy toimii ratarakenteessa lämmöneristeenä. Käyttöympäristön rasituksissa levyn lämmönvastus kuitenkin heikkenee seuraavissa kappaleissa selostetulla tavalla. Eristyskykyä heikentää kasvava lämmönjohtavuus, joka on seurausta sekä levyn vesipitoisuuden lisääntymisestä että solukaasun vaihtumisesta [21, 16]. Lämmönjohtavuus kasvaa myös levyn kokoonpuristumisen myötä samoin kuin eristelevyyn tunkeutuvien sepelirakeiden vaikutuksesta, sillä maamateriaalien lämmönjohtavuus on moninkertainen levyn lämmönjohtavuuteen verrattuna (ks. taulukko 2.4). Sepelirakeiden painautuminen ja siitä mahdollisesti seuraava levyn pinnan lohkeilu ohentaa levyn paksuutta, mikä myös luonnollisesti heikentää eristävyttä. Mikäli levyyn syntyy taivutusrasituksesta halkeama, routalevykerroksen eristävyys heikentyy selvästi, vaikka levy halkeaman ympäristössä olisi uutta vastaavaa.

Koska levyn lämmönjohtavuuden ja "ehjän paksuuden" muutokset vaikuttavat levyn lämmönvastukseen, routaeristuksen mitoituksessa on huomioitava lämmönjohtavuuden kasvu ja paksuuden pieneneminen levyn mitoitusajana.

3.2 Solukaasun vaihtuminen

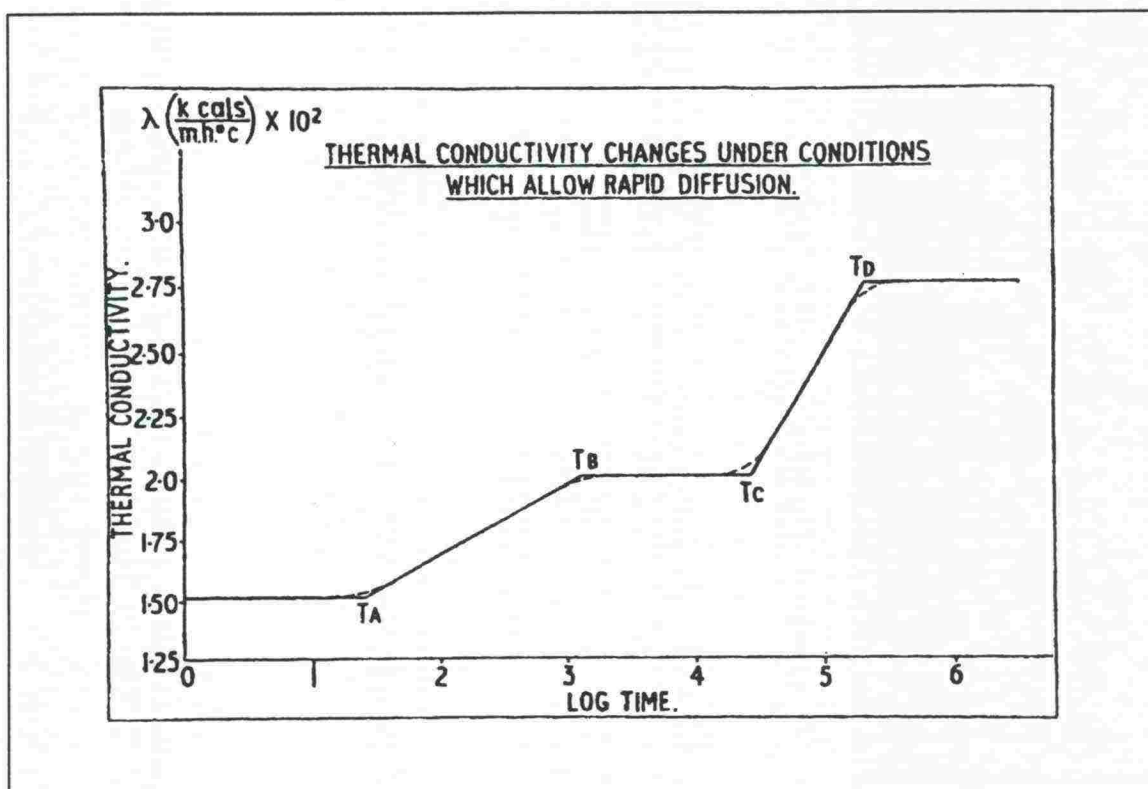
Suulakepuristetun polystyreenin valmistuksessa umpinaisen solurakenteen soluihin jäävä pornekaasu diffusoituu levyn käyttöolosuhteista riippumatta ajan myötä alenevan osapaineen suuntaan eli ulos soluista. Levyn ympäristön kaasut, ilman typpi ja happi, diffusoituvat vastaavasti eristeeseen täyttäen solut lopulta kokonaan. Solukaasun vaihtumisnopeus riippuu eristeen huokosrakenteesta ja pintojen laadusta sekä diffusoituvasta kaasusta. Taulukosta 3.1 nähdään XPS-levyjen valmistuksessa käytettyjen pornekaasujen puoliintumisaajat levyn solukosta kahdella eri levypaksuudella.

Taulukko 3.1. Eri solukaasujen puoliintumisaikoja, kun levyn paksuus on 50 tai 100 mm [31].

Ponneaine	Puoliintumisaika [a] (50 mm levy)	Puoliintumisaika [a] (100 mm levy)
CFC 12	24	95
HCFC 22	0,3	1
HCFC 142b	21	84
HFC 134a	1,9	7,6
HFC 152a	0,1	0,7
CO ₂	0,01	0,1

Koska porneaineen lämmönjohtavuus on pienempi kuin soluihin diffusoituvan ilman (ks. taulukko 2.1), eristelevyn lämmönjohtavuus kasvaa solukaasun vaihtumisen seurauksena. Lämmönjohtavuuden periaatteellinen muutos ajan suhteen on esitetty kuvassa 3.1.

Kuten taulukosta 2.1 käy ilmi, CFC-ponnekaasujen lämmönjohtavuus on vain noin kolmannes ilman lämmönjohtavuudesta ja lisäksi niiden puoliintumisaika on erittäin suuri. Hiilidioksidin kohdalla tilanne on päinvastainen. Sen lämmönjohtavuus on selvästi yli puolet ilman lämmönjohtavuudesta ja puoliintumisaika lyhyt, eli hiilidioksidi poistuu solukosta hyvin nopeasti CFC-kaasuihin verrattuna. Näin ollen solukaasun vaihtuminen ja siitä seuraava eristeen lämmönjohtavuuden kasvu tapahtuu nykyistä CO₂-ponnekaasua käytettäessä huomattavasti nopeammin kuin aiemmin käytetyillä CFC-ponnekaasuilla (ks. kuva 3.2).



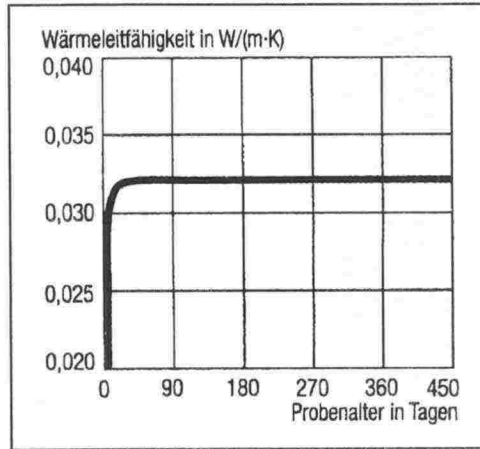
Kuva 3.1. Periaate CFC-kaasulla paisutetun XPS-levyn lämmönjohtavuuden kasvusta ajan suhteen [23].

T_A on oletettu ajankohta, josta lähtien ilman diffusoituminen solukoon aiheuttaa λ -arvon suurenemisen,

T_B on oletettu ajankohta, jolloin ilman kaasujen osapaine-erot ovat tasoittuneet solukon ja ympäristön välillä,

T_C on oletettu ajankohta, johon mennessä riittävästi CFC-kaasua on diffusoitunut ulos aiheuttaakseen jälleen λ -arvon suurenemisen,

T_D on oletettu ajankohta, johon mennessä kaikki CFC-kaasu on poistunut, ts. solukko on ilmatäyteinen



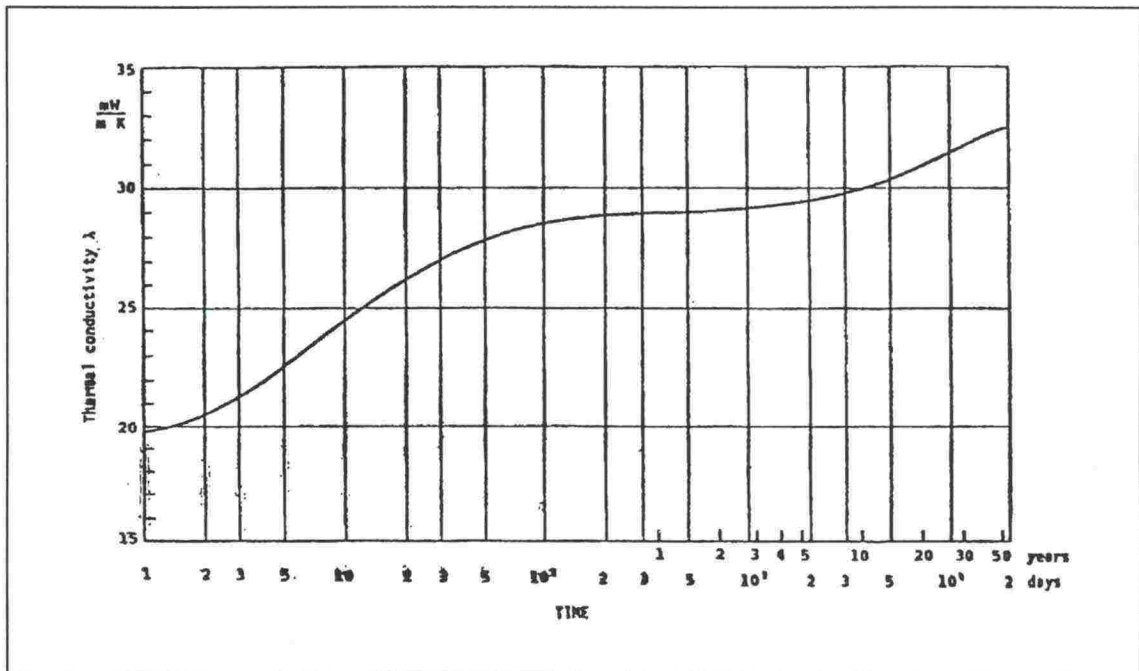
Kuva 3.2. CFC-, HFC- ja HCFC- vapaan Styrodur C- levyn lämmönjohtavuus valmistuksesta kuluneen ajan suhteen [6].

CO₂ diffusoituu hiilidioksidilla paisutettujen XPS-levyjen soluista varsin nopeasti ilman typen ja hapen täyttäessä solut. Finnfoam Oy:n siirtyessä käyttämään hiilidioksidia ponneaineena vuonna 1999 levyjen laadunvalvonnassa havaittiin, että sahauspinnat imeytyvät voimakkaasti levyn sisään (kuva 3.3). Tämä johtui todennäköisesti hiilidioksidin typeä ja happea nopeamman diffusoitumisen seurauksena soluihin syntyneestä alipaineesta [48].



Kuva 3.3. Levyn sahauspintojen imeytyminen levyn sisään [48].

Kuvassa 3.4 on esitetty Dow Chemical Company:n kehittämällä mallilla laskettu, solu-kaasun vaihtumisesta johtuva XPS-levyn lämmönjohtavuuden kasvu ajan suhteen. Malli on kehitetty mitä ilmeisimmin CFC-12-kaasulla paisutetulle XPS-levylle. Mallinnuskäyrän alkupää on varmennettu kokeellisin mittauksin 2300 vrk:n ikään asti. Käyrästä nähdään, että lämmönjohtavuuden alkuarvo oli 24 °C lämpötilassa määritettynä: $\lambda_{24} = 0,0197\text{ W/Km}$, 120 vrk jälkeen $\lambda_{24} = 0,029\text{ W/Km}$ ja 50 vuoden jälkeen $\lambda_{24} = 0,033\text{ W/Km}$. Mallin mukaan kokonaan ilmatäytteisillä soluilla saavutetaan lämmönjohtavuus $\lambda_{24} = 0,035\text{ W/Km}$. [22]



Kuva 3.4. Laskentamalli XPS-levyn lämmönjohtavuudesta ajan funktiona. Levyn paksuus on 25 mm, tiheys 36 kg/m^3 ja lämpötila 24 °C [22].

3.3 Kosteus

3.3.1 Kosteuden imeytyminen routalevyyn

Kosteuden siirtyminen ehjään polystyreenilevyyn tapahtuu pääosin vesihöyryn diffuusiona. Levyn pintojen välisen lämpötilagradientin suuruus vaikuttaa levyyn kerääntyvän kosteuden määrään, sillä vesihöyry tunkeutuu levyyn lämpötilagradientin vaikutuksesta [19]. Tierakenteessa kosteuden liike eristelevyssä on kesällä voimakasta ja suuntautuu alaspäin. Talvella liike on hidasta ja suuntautuu ylöspäin [40].

Ehjä polystyreenilevy on suhteellisen läpäisemätön nestemäiselle vedelle. Levyyn diffusoitunut vesihöyry tiivistyy solujen välillä oleviin pieniin huokosiin. Itse soluseinämien läpäiseminen on hidasta ja hidastuu edelleen sisempiin kerroksiin tultaessa [11]. Jos levyn rakenne vaurioituu, nestemäisen veden tunkeutuminen levyyn lisääntyy moninkertaisesti. Vesi kerääntyy em. pienten huokosten lisäksi myös vaurioituneisiin soluihin [11]. Edellä mainittu, samoin kuin seuraavakin, on todettu EPS:llä, mutta

samanlaisesta umpisoluisesta rakenteesta johtuen voidaan olettaa, että sama pätee myös XPS:llä.

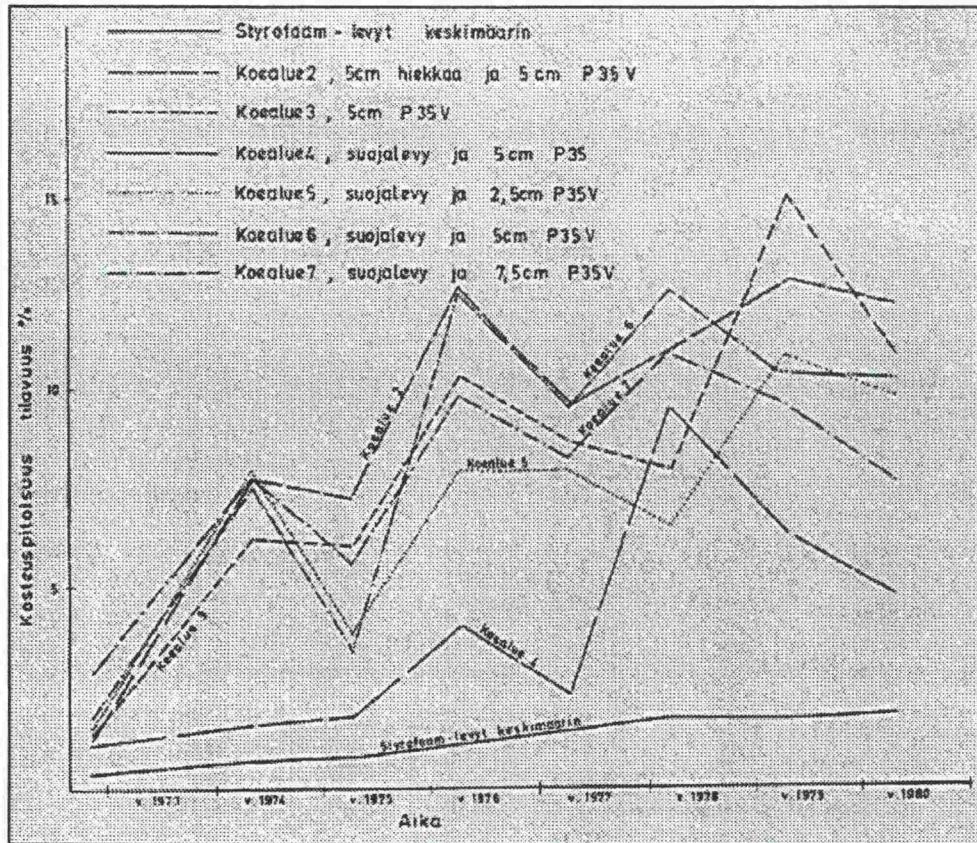
Toistuva syklimäinen altistuminen vuoroittain alhaiselle lämpötilalle ja vesihöyrylle kiihdyttää veden absorptiota polystyreenilevyyn. Solujen sisään diffusoituneen vesihöyryn tiivistyminen vedeksi kiihtyy alhaisessa lämpötilassa. Solujen sisällä olevan höyrymäisen veden osuus vastaavasti pienenee. Kun lämpötila nousee uudelleen, siitä seuraa solujen sisällä ja ulkopuolella olevan vesihöyryn kasvanut konsentraatioero. Suuremman konsentraatioeron johdosta vesihöyryn diffuusio solun seinämän läpi kiihtyy. Näin ollen jokainen jäätymis-sulamissykli lisää levyyn tietyn määrän absorboitunutta vettä. [11]

3.3.2 Routalevyn kosteuspitoisuuden lisääntyminen rata- ja tierakenteissa

Tie- ja ratarakenteisiin asennettujen routalevyjen pitkäaikaisseurannat ovat osoittaneet, että routalevyjen kosteuspitoisuus kasvaa ajan myötä. Lisäksi rakenteeseen asennetun levyn kosteuspitoisuus on vuodenajasta ja sääoloista riippuvainen. Levyn kosteuspitoisuudessa on todettu vaihtelua myös raiteen suunnassa. Ratapölkyn alta otetun näytteen kosteuspitoisuus on havaittu keskimäärin suuremmaksi kuin ratapölkkyjen välistä otetun näytteen kosteuspitoisuus [20].

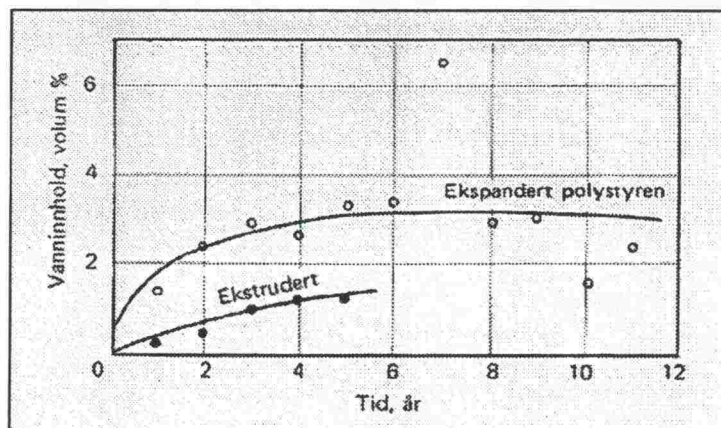
Routalevyjen kosteuspitoisuuden kehittymistä tie- ja ratarakenteissa on tarkkailtu monissa eri tutkimuksissa. Riihimäen koalueella mitattiin rataan asennettujen eri tavoilla suojattujen EPS- ja XPS-levyjen kosteuspitoisuuksia eri aikoina (ks. kuva 3.5).

Kuvasta nähdään, että kaikkien EPS-levyjen kosteuspitoisuudet nousivat kahdeksan tarkkailuvuoden aikana vähintäänkin 10 tilavuusprosenttiin. Syynä EPS-levyjen suurehkoihin kosteuspitoisuuden vaihteluihin ovat sääolot tai mahdollisesti levyjen epätasalaatuisuus, joskin näytteet otettiin 0,5 m välein. XPS-levyn kosteuspitoisuus pysyi kahdeksan vuoden jälkeenkin alle 2 tilavuusprosentin [30].



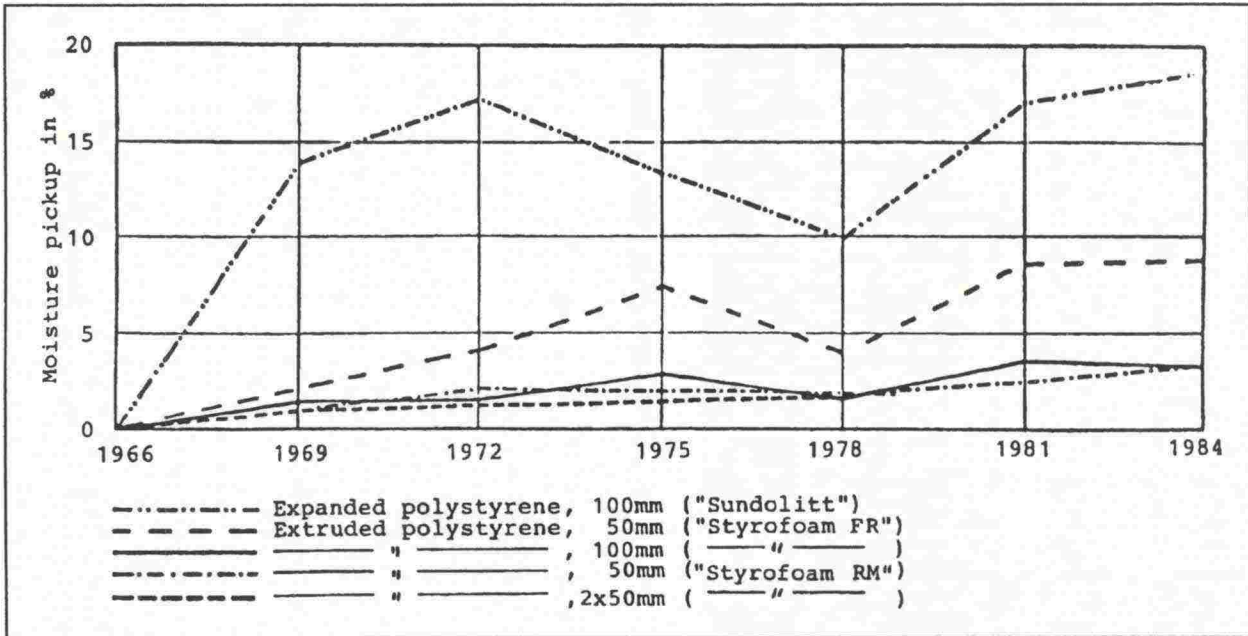
Kuva 3.5. Riihimäen koealueelta eri tavoilla suojattujen EPS- ja XPS-levyjen kosteuspitoisuuden kehitys vuosina 1972-1980 [30].

Norjassa on havaittu kuvan 3.6 mukainen kosteuspitoisuuden kehitys rataa asennetuissa routalevyissä [33].



Kuva 3.6. Norjassa todettu kosteuspitoisuuden kehitys rataa asennetuissa EPS- ja XPS-levyissä. Näytteet on otettu ratapölkkyjen välistä [33].

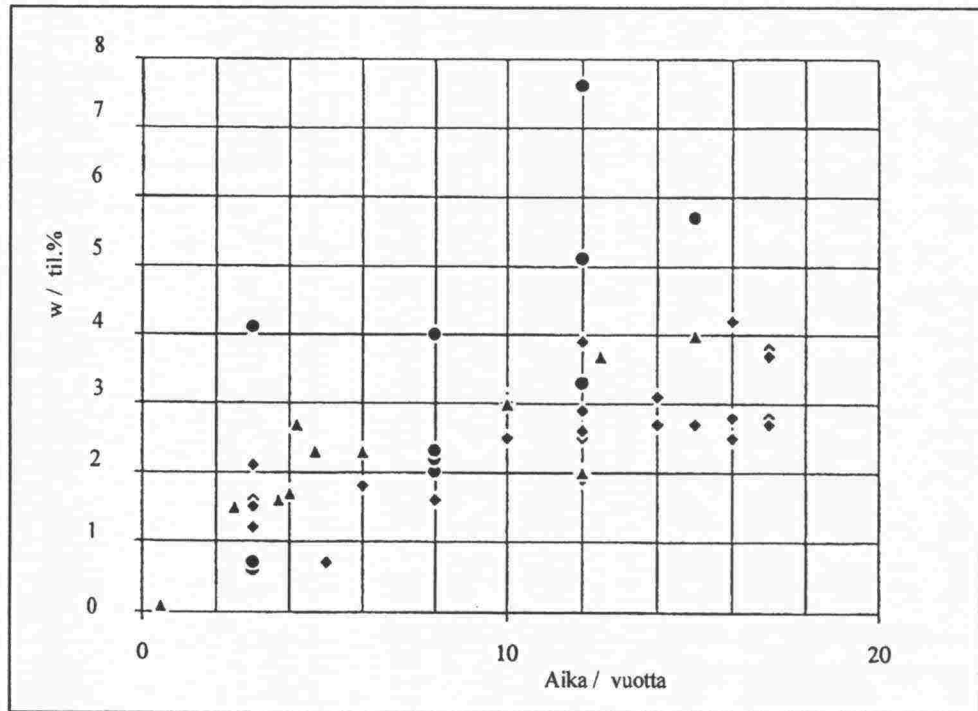
Tierakenteeseen asennetuista routalevyistä on mitattu Norjassa Lieren koetiellä [40] kuvan 3.7 mukainen kosteuspitoisuuden kehitys vuosina 1966-1984. Tutkimuksen perusteella on arvioitu 50 mm Styrofoam FR-tyyppisen XPS-levyn kosteuspitoisuuden olevan 40 vuoden mitoitusaajan jälkeen noin 20 tilavuusprosenttia. Vastaavan tyyppisen 100 mm levyn kosteuspitoisuus on arvioitu noin puolet pienemmäksi.



Kuva 3.7. Lieren koetien rakenteeseen asennettujen EPS- ja XPS-routalevyjen kosteuspitoisuuden kehitys vuosina 1966-1984 [40].

Suomessa Helsingin – Jorvaksen moottoritiellä on mitattu kosteuden kerääntymistä XPS-levyyn yli 20 vuoden seurantajaksolla. Muovikalvolla suojatun Styrofoam HI-levyn kosteuspitoisuuden on todettu kasvavan keskimäärin noin 0,35 tilavuusprosenttia vuodessa. Suojaamattomalla eristeellä keskimääräiseksi lisääntymisvauhdiksi saatiin noin 0,55 tilavuusprosenttia vuodessa. [35]

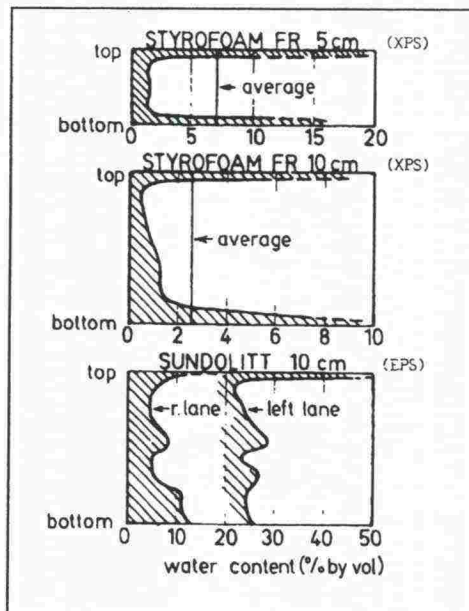
Ruotsalaisessa tutkimuksessa [21] on mitattu vaihtelevia aikoja maantiessä olleiden XPS-levyjen kosteuspitoisuuksia, jotka on esitetty kuvassa 3.8. Kuvassa on esitetty myös tutkimuksen kirjallisuusosuuden tuloksena selvitetty aiemmat mittaustulokset. Tierakenteeseen asennettujen XPS-eristelevyjen kosteuspitoisuuden kasvun voidaan todeta olevan melko lineaarista routalevyn iän suhteen. Keskimäärin kosteuspitoisuus on kasvanut ensimmäisenä kahtena vuonna noin 1 tilavuusprosenttia ja sen jälkeen noin 0,2 tilavuusprosenttia vuodessa.



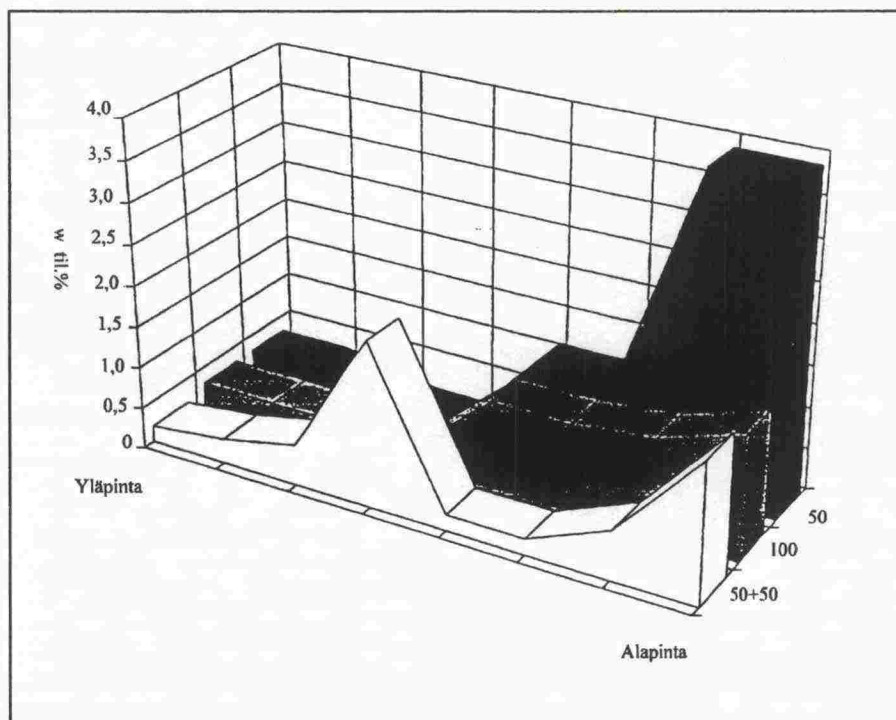
Kuva 3.8. XPS-routalevyn kosteuspitoisuuden kasvu tierakenteessa levyn iän suhteen. Eri muotoiset symbolit tarkoittavat seuraavaa: [21].

- ▲ Tutkimuksen yhteydessä mitatut
- ◆ Kirjallisuudesta selvitetyt
- Levypaksuus 4-8 cm tai asennussyvyys alle 0,25 m

Kosteuspitoisuuden on todettu vaihtelevan myös tierakenteeseen asennetun levyn pystysuunnassa. XPS-levyn pinnoissa kosteuspitoisuus on huomattavasti suurempi kuin levyn keskiosissa (ks. kuvat 3.9 ja 3.10). Tämä on eristävyiden kannalta toivottavampaa kuin kosteuden tasaisempi jakaantuminen koko levyyn, kuten esimerkiksi EPS-levyssä usein on [40].



Kuva 3.9. Kosteuspitoisuuden pystysuuntainen jakautuminen tierakenteeseen asennetussa 50 ja 100 mm Styrofoam XPS-levyssä. Lieren koetie, Norja [40].



Kuva 3.10. Kosteuspitoisuuden jakautuminen tierakenteeseen asennetun XPS-levyn pystysuunnassa levypaksuuksilla 50+50, 100 ja 50 mm (1 kg/ m³ vastaa 0,1 tilavuusprosenttia). Linköping, Ruotsi. [21]

Kuvasta 3.10 nähdään, että jokaisen levyn alapinnan kosteuspitoisuus on varsin suuri suhteessa muuhun levyyn. Kummassakin päällekkäin asennetussa levyssä (50+50 mm) on levyjen alapinnoissa kosteuspitoisuuden huippu. Päällekkäin asennettujen levyjen (50+50 mm) yhteenlaskettu kosteuspitoisuus on suurempi kuin yhden vastaavan paksuisen (100 mm). Levyn pintaosien keskimääräistä selvästi suurempi kosteuspitoisuus on havaittu myös Suomen tierakenteissa [57]. Kuvista 3.9 ja 3.10 nähdään lisäksi, että paksumman levyn (100 mm) keskimääräinen kosteuspitoisuus on selvästi pienempi kuin ohuemman 50 mm levyn. Kosteuden vastustuskyvyn on todettu kasvavan verrannollisena levyn paksuuden neliöön [40]. Tästä syystä Norjassa onkin päädytty asettamaan eristeille minimipaksuudet. Tiessä käytettävän XPS-levyn minimipaksuus on 45 mm.

Edellä mainitun perusteella voidaan todeta, että kaksi päällekkäin asennettua levyä on kosteuden absorptio-ominaisuuksiltaan epäedullisempi vaihtoehto kuin yksi vastaavan paksuinen levy. Toisaalta kaksi päällekkäistä levyä kestää paremmin eristeeseen kohdistuvaa mekaanista rasitusta [27, 41].

Turengin ratapihalle vuonna 1990 tehdyn routalevytutkimuksen yhteydessä asennetuista routalevyistä mitattiin vesipitoisuuksia kesällä 1999. Kohteeseen oli asennettu kahden eri valmistajan levyjä, Dowin Styrofoamia ja Finnfoamia eri syvyyksille suoraan tukikerroksen alle. Asennetut Finnfoam-levyt oli jo aiemmin todettu laadultaan heikoksi (ks. kappale 2.1). Otetuista näytteistä määritetyt kosteuspitoisuudet on esitetty taulukossa 3.2. Vesipitoisuuksista voidaan todeta, että Styrofoamin kosteuspitoisuuden keskimääräinen kasvuvauhti on 9 vuoden aikana ollut 45 cm asennussyvytydellä 0,33 tilavuusprosenttia vuodessa ja 55 cm asennussyvytydellä 0,25 tilavuusprosenttia

vuodessa, mitkä vastaavat suuruusluokaltaan aiemmin esitettyjä kosteuspitoisuuden kasvunopeuksia. Sen sijaan Finnfoam-levyn kosteuspitoisuus on kasvanut huomattavasti enemmän, mikä vahvistaa käsitystä kyseisen tuotantoerän laatuongelmista. [27]

Taulukko 3.2. Turengin ratapihalta 1999 otettujen routalevynäytteiden kosteuspitoisuudet [27].

Levy, asennussyvyys	Kosteuspitoisuus (p.%)	Kosteuspitoisuus (til.%)	Kosteuspitoisuuden kasvu (p.% / a)	Kosteuspitoisuuden kasvu (til.% / a)
Styrofoam, Kv-45 cm	41,9	2,93	4,7	0,33
Styrofoam, Kv-55 cm	44,6	2,23	5,0	0,25
Finnfoam, Kv-45 cm	238,3	23,86	26,5	2,65
Finnfoam, Kv-55 cm	120,9	12,05	13,4	1,33

Turengin ratapihalta otettujen näytteiden lisäksi syksyllä 1999 otettiin vielä lisää näytteitä kosteuspitoisuuden määrittystä varten. Näytteitä otettiin vuonna 1980 asennetusta Basf-levystä ja vuonna 1998 asennetusta Finnfoam-levystä. Koska näytteiden tilavuutta ei ole määritetty, mittaustuloksista ei ole laskettavissa kosteuspitoisuutta tilavuusprosentteina eikä niitä voida vertailla muiden tulosten kanssa. Tulosten keskinäisessä vertailussa voidaan todeta, että vuoden radassa olleet Finnfoam-levyt ovat vettyneet lähes yhtä paljon kuin 19 vuotta hiekkasuojauksen alla kahdessa kerroksessa olleet Basf-levyt (ks. taulukko 3.3). Finnfoam-levyn vettyneisyys vuoden jälkeen vastasi likimäärin Turengin ratapihalta määritettyjen Styrofoam-levyjen vettyneisyyttä. Basf- ja Finnfoam-levyjen vesipitoisuuden kasvuvauhti on täysin eri suuruusluokkaa, mikä antaa viitteitä siitä, että levyn vesipitoisuus kasvaa voimakkaammin heti asennuksen jälkeisenä vuonna kasvun hidastuessa myöhemmin. Taulukon 3.3 kosteuspitoisuuksien vertailussa on myös syytä huomioida, että levyt on eri valmistusajankohdista johtuen paisutettu eri ponnekaasuilla, mikä saattaa vaikuttaa eroihin niiden kosteuspitoisuuksien kasvuvauhdissa.

Taulukko 3.3. Vuoden 1999 syksyllä otettujen lisänäytteiden kosteuspitoisuudet painoprosentteina [27].

Asennusvuosi	Levyvalmistaja	Asennussyvyys	Kosteuspitoisuus (p.%)	Kosteuspitoisuuden kasvu (p.% / a)
1980	Basf	Kv-42	49	2,6
1980	Basf	Kv-46	54	2,8
1980	Basf	Kv-40	73	3,8
1980	Basf	Kv-40	34	1,8
1998	Finnfoam	Kv-70	38	38
1998	Finnfoam	Kv-90	36	36
1998	Finnfoam	Kv-93	29	29
1998	Finnfoam	Kv-79	28	28
1998	Finnfoam	Kv-57	30	30
1998	Finnfoam	Kv-56	42	42

Yhteenvetona voidaan todeta XPS-routalevyjen vastustavan kosteuden tunkeutumista levyyn varsin hyvin. Taulukkoon 3.4 on em. seurantatutkimuksista laskettu kosteuspitoisuuden vuotuinen lisääntyminen olettamalla kasvuvauhti lineaariseksi.

Taulukko 3.4. Rata- ja tierakenteisiin asennettujen routalevyjen kosteuspitoisuuden seurantatutkimusten mukainen kosteuspitoisuuden vuotuinen lisääntyminen.

Tutkimus			Kosteuspitoisuuden lisääntyminen [til.% /a]
Rata / Tie	Maa	Levyn asennusvuosi	
Rata	Suomi	1972	0,5 til.% + 0,2 til.% / a
Rata	Norja	1970	0,25 til.% / a
Tie	Norja	1966	Styrofoam RM: 0,25 til.% / a, Styrofoam FR: 0,5 til.% / a
Tie	Suomi	1966	Suojattu 0,35 til.% / a, suojaamaton 0,55 til.% / a
Tie	Ruotsi	1968-1988	1 til.% + 0,2 til.% / a
Rata	Suomi	1990	Kv-55cm Styrofoam: 0,25 til.% / a, Kv-55cm Finnfoam: 1,33 til.% / a

Arviona nykyiset laatuvaatimukset täyttävän XPS-levyn kosteuspitoisuuden kasvuvauhdille sekä tie- että ratarakenteessa voitaneen pitää noin 0,25-0,30 til% vuodessa, mikä tekee routalevyltä vaaditun 40 käyttövuoden aikana 10-12 til%. Kosteuden kerääntymiseen vaikuttaa kuitenkin monet seikat, kuten levyn paksuus, maaperän kosteusolosuhteet sekä vallitsevat kuormitustasot ja liikennemäärät levyn rakenteen vaurioitumisen nimissä. Tutkimusten perusteella EPS-levyjen kosteuspitoisuus kasvaa huomattavasti suuremmaksi ja nopeemmin kuin XPS-levyjen. Tosin on todettava, että verrattuna tutkimusten EPS-levyihin, on levyjen laatu parantunut. Nykyisin on saatavilla yli 400 kPa puristuslujuista EPS-levyä. Saatavilla on myös paisutettua ns. superpolystyreeniä (SPS), joka täyttää RHK:n nykyiset vaatimukset sykliselle kuormituskestävyydelle [50].

3.3.3 Kosteuden absorption vaikutus routalevyn lämmönjohtavuuteen

Kosteuden kerääntyminen polystyreenilevyyn vaikuttaa lämmönjohtavuutta kasvattavasti ratarakenteessa kyseeseen tulevilla kosteuspitoisuuden arvoilla. Tämä johtuu siitä, että veden lämmönjohtavuus on noin 20-kertainen ilman lämmönjohtavuuteen verrattuna. Kosteuden merkitys lämmönjohtavuuteen korostuu alle 0 °C lämpötiloissa, jolloin eristeessä oleva vesi jäätyy. Jään lämmönjohtavuus on noin nelinkertainen veden lämmönjohtavuuteen nähden. Toisaalta kuivan eristeen lämmönjohtavuus pienenee lämpötilan laskiessa (vrt. taulukko 3.5).

Kosteuspitoisuuden ja lämmönjohtavuuden korrelaatio on todettu melko lineaariseksi. Tällöin kostean levyn lämmönjohtavuudelle saadaan:

$$\lambda_m = \lambda_k + k \cdot w, \quad \text{jossa} \quad (5)$$

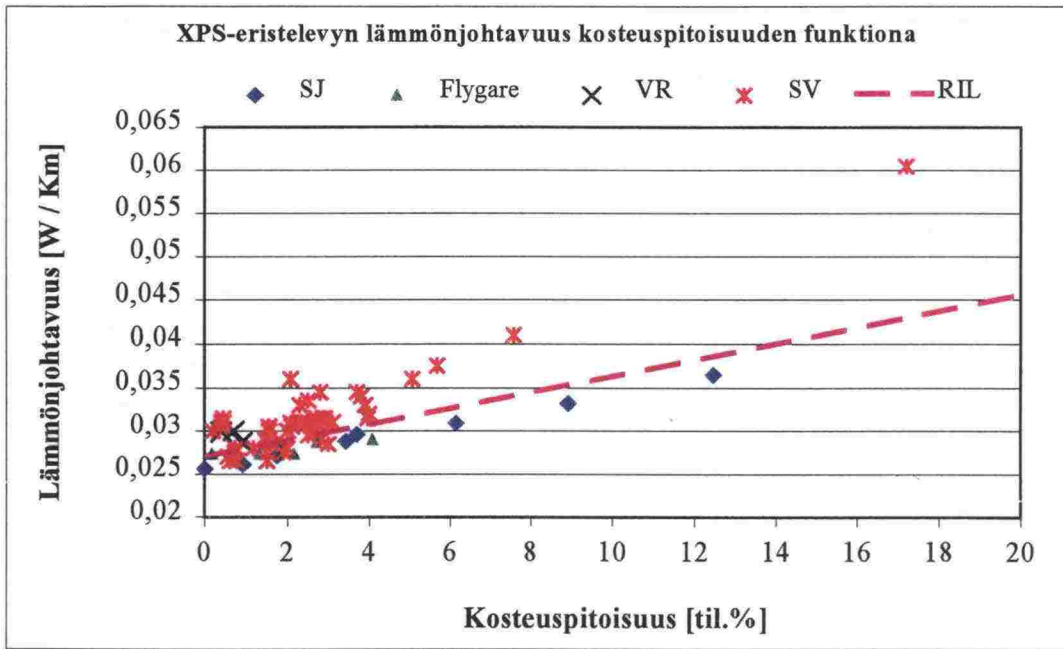
λ_m = kostean levyn lämmönjohtavuus W/Km

λ_k = kuivan levyn lämmönjohtavuus W/Km

k = levyn kosteuspitoisuuden vaikutusta lämmönjohtavuuteen kuvaava kerroin

w = levyn kosteuspitoisuus til.%

Eristelevyn kosteuspitoisuuden ja lämmönjohtavuuden korrelaatiota on selvitelty monissa eri tutkimuksissa. Kuvaan 3.10 on koottu tutkimuksissa todettuja XPS-eristeen kosteuspitoisuuden ja lämmönjohtavuuden yhteyksiä. Katkoviiva kuvaa RIL:n käsikirjassa "Lämmön- ja kosteudeneristys" [45] esitettyä riippuvuutta oletuksella, että kuivan levyn lämmönjohtavuus on 0,027 W/Km. Kuvaan 3.11 on piirretty kunkin tutkimuksen mukainen lineaariseksi oletettu trendiviiva.



Kuva 3.11. XPS-eristelevyn kosteuspitoisuuden ja lämmönjohtavuuden välinen riippuvuus eri tutkimusten mukaan. Tutkimuslyhenteet tarkoittavat seuraavaa:

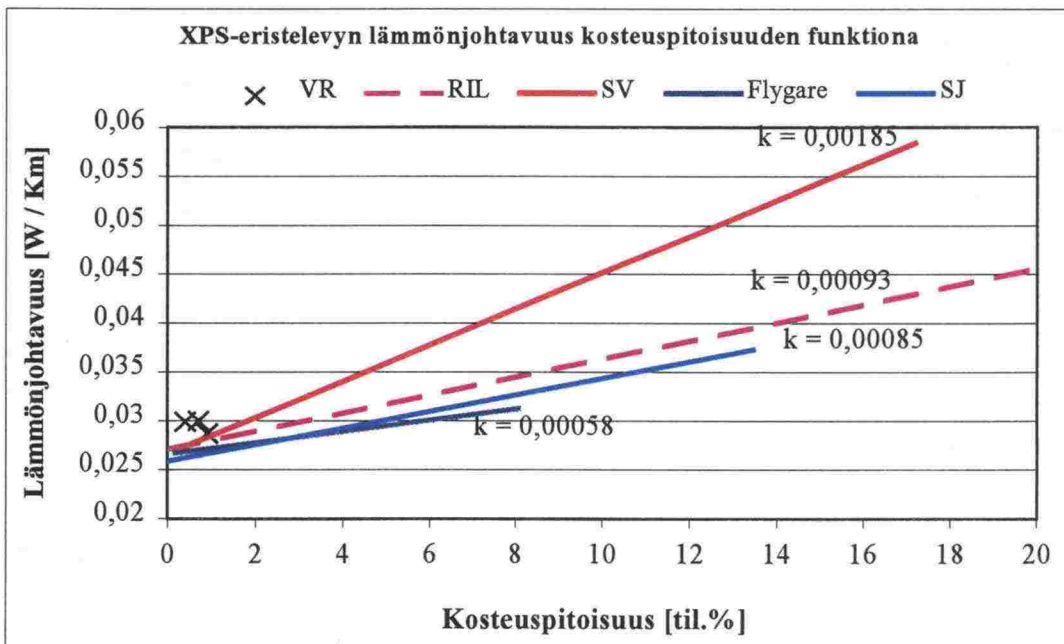
SJ - Ruotsin rautateiltä otetut näytteet 1970-77 [41]

Flygare - Lähteessä [15] esitetyt mittaustulokset

VR - VR:n tutkimus v. 1972-80 [54]

SV - Ruotsin teistä v. 1968-88 otetut näytteet, joista suurin osa tyypiltään Styrofoam HI 50 [21]

RIL - RIL:n käsikirjassa [45] esitetty arvo, kun $w < 20$ til. %



Kuva 3.12. Regressiosuorat kuvassa 3.11 esitetyille tutkimustuloksille. Kuvassa näkyy myös kunkin tutkimuksen mukainen lämmönjohtavuuden ja kosteuspitoisuuden välisen yhteyden korrelaatiokerroin (k). VR:n mittaamille näytteille regressiosuoraa ei ole määritetty, koska mittaustuloksia oli vain kolme kappaletta, nekin lähes samoilla kosteuspitoisuuksilla.

Kuvasta 3.12 nähdään, että kosteuspitoisuuden vaikutusta lämmönjohtavuuteen kuvaavissa kertoimissa on jonkin verran eroja. Ruotsin teistä otetuille näytteille on mitattu selvästi suurin kerroin, 0,00185, mikä tarkoittaa, että 1 tilavuusprosentin lisäys kosteuspitoisuudessa lisää levyn lämmönjohtavuutta 0,00185 W/Km . RIL:n käsikirja antaa korrelaatiokertoimelle noin puolta pienemmän arvon 0,00093. Materiaalivalmistaja Dowin esitteessä [9] todetaan, että $k < 0.001$. Kertoimet kuvassa 3.12 vaihtelevat välillä 0,00058- 0,00185.

Levyt, joista kuvan 3.12 korrelaatiot on määritetty, ovat melko vanhoja (1966-1988). On vaikea arvioida, onko uudempien levyjen korrelaatio jollain tapaa muuttunut kuvien pohjana oleviin levyihin nähden. Lisäksi on huomattava, että ennen vuotta 1989 valmistetuissa levyissä ponneaineena on käytetty CFC-12:ta, jonka diffuusiosta levyn soluista pois seuraa lämmönjohtavuuden kasvu (ks. kappale 3.1), joka myös sisältyy kuvissa 3.11 ja 3.12 esitettyihin tuloksiin. Toisaalta nykyisillä tuotteilla on uutena selvästi suurempi lämmönjohtavuus kuin aiemmilla CFC- ja HCFC-kaasuilla paisutetuilla levyillä (ks. taulukko 3.5)

Taulukko 3.5. Kuivan Styrodur- levyn ja CFC-, HFC- ja HCFC-vapaan Styrodur C-levyn lämmönjohtavuuksien vertailu eri lämpötiloissa määritettynä [7].

Lämpötila [°C]	Lämmönjohtavuus [W/Km]	
	Styrodur	Styrodur C
-80	0,021	0,024
-60	0,022	0,026
-40	0,023	0,028
-20	0,024	0,030
0	0,026	0,032
10	0,027	0,033
20	0,027	0,034
30	0,028	0,035
40	0,029	0,036
50	0,030	0,037

Mikäli pyritään siihen, että routaeristys estää roudan tunkeutumisen routivaan maahan koko routalevyn käyttöajan, routalevyn lämmönjohtavuuden mitoitusarvona tulisi käyttää arvoa, joka on määritetty mitoituslämpötilassa suurimman mahdollisen kosteuspitoisuuden omaavasta levystä. Edellisessä kappaleessa arvioitiin XPS-levyn keräävän noin 10 tilavuusprosenttia kosteutta 40 vuoden käyttöaikana. Oletuksesta, että CFC-12-ponnekaasulla paisutetun levyn $\lambda_k = 0,027$ saadaan em. kaavalla ja kuvan 3.11 suurimman kertoimen arvolla levyn lämmönjohtavuudeksi 40 vuoden kuluttua 0,046 W/Km , mikä ylittää selvästi mitoituksessa käytetyn 0,037 W/Km . RIL:n käsikirjassa [45] esitetyllä kertoimella saadaan vastaavasti 0,036 W/Km . Lisäksi on syytä huomioida, että nykyisin käytettävillä ponnekaasuilla päädytään merkittävästi aiempaa suurempaan λ_k -arvoon (vrt. taulukko 3.5 ja kappale 5.6).

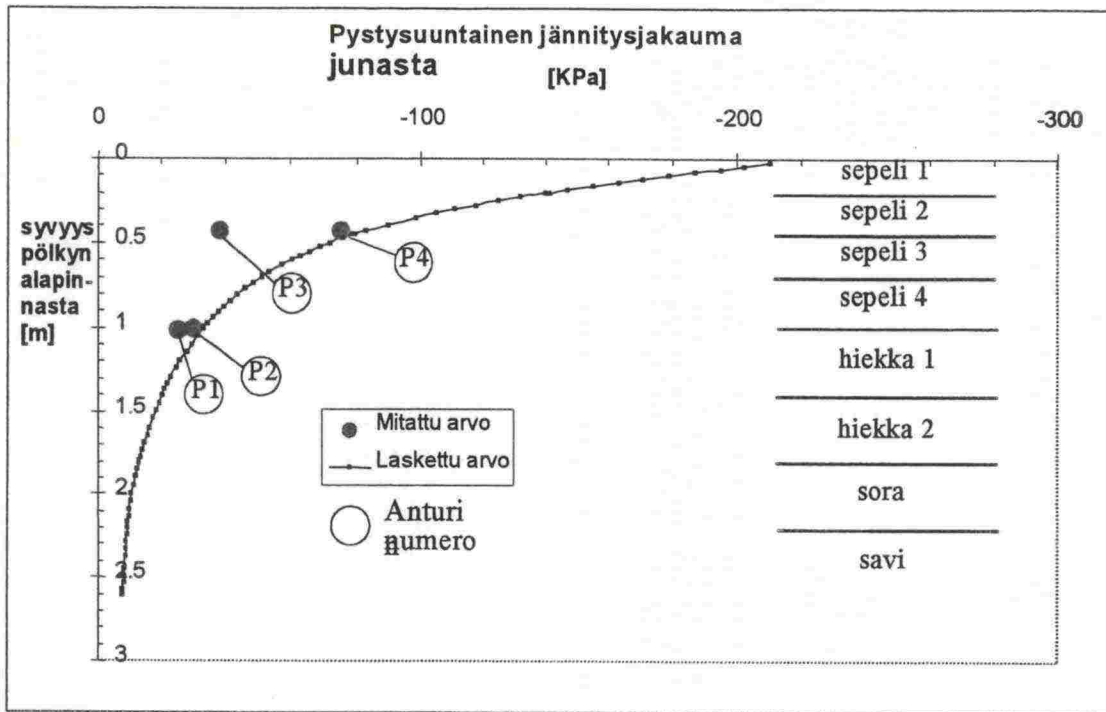
3.4 Mekaanisen kuormituksen kestävyys

3.4.1 Routalevyyn kohdistuva mekaaninen kuormitus ratarakenteessa

Routalevyihin kohdistuu yläpuolisten rakenteiden painosta johtuvaa staattista kuormitusta sekä liikenteestä johtuvaa syklistä kuormitusta. Liikenteestä levyihin kohdistuva kuormitus on suuri verrattuna polystyreenilevyihin muissa käyttökohteissa kohdistuviin kuormituksiin. Tämä asettaa suuret vaatimukset levyn kuormituskestävyydelle, joten ratarakenteessa käytetään ainoastaan suuren puristuslujuuden omaavia XPS-levyjä.

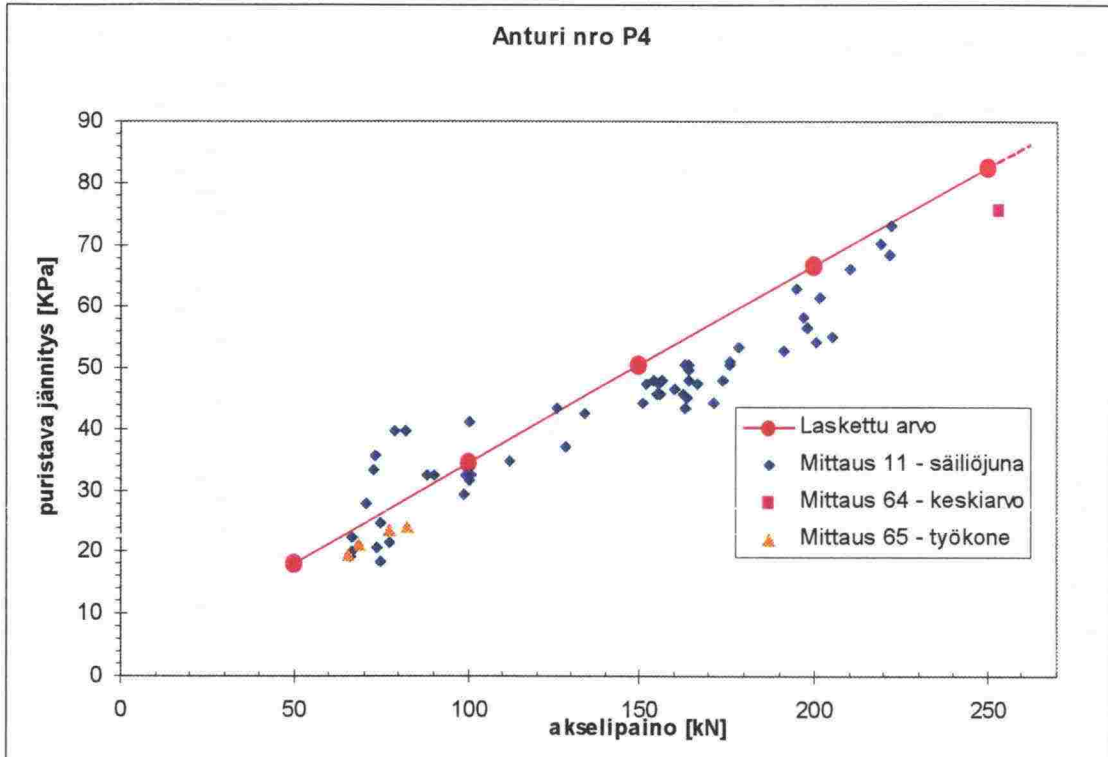
Levyn kuormituskestävyysvaatimukset perustuvat lämmöneristävyysominaisuuksien säilymiseen. Alhaisen lämmönjohtavuuden säilyttämiseksi levyn tulee puristua mahdollisimman vähän kokoon liikennekuormituksen alaisena. Levyn pinnan tulee olla riittävän vastustuskykyinen sepelirakeista välittyvälle kuormitukselle, jotta rakeet eivät toistuvan liikennekuormituksen johdosta painaudu levyyn liiaksi ohentaen samalla levyn eristävää paksuutta ja helpottaen veden tunkeutumista levyyn. Levyn tulisi lisäksi kestää liikennekuormituksesta sekä alapuolisten rakennekerrosten ja pohjamaan mahdollisesta epätasaisesta painumisesta aiheutuva taivutusrasitus siten, että levyyn ei synny halkeamia. Erityisen ongelmallinen myös routalevyn kannalta on tilanne, jossa routalevyn alla olevan kerroksen kantavuus ei ole riittävä. Tämä on mahdollista esim. silloin, jos radan perusparannuksen yhteydessä lisätään tukikerrospaksuutta 10 cm, rataa asennetaan 10 cm routalevyt ja korkeusviivan tasoa ei muuteta. Tällöin joudutaan käytännössä poistamaan välikerrosta 20 cm paksuudelta, jolloin routalevyn alapuolella on suoraan välikerrosta huomattavasti alhaisemman kantavuuden omaava eristyskerros.

Kouvolan ja Korian välisellä rataosuudella mitattiin ratarakenteen jännityksiä kesällä 1999. Kuvassa 3.13 on esitetty mittaustulokset 250 kN akselikuormalla ja mittausten pohjalta kerrosrakenneohjelmalla luodun mallin antamat jännitykset rakenteen eri syvyyksillä. Mallinnetun jännitys jakauman mukaan routalevyn tasolla (0,35 m ratapölkyn alapinnasta) vaikuttava pystysuuntainen jännitys on noin 110 kPa [26]. On kuitenkin muistettava, että junan pyörästä ratarakenteeseen välittyvän kuormituksen suuruuteen vaikuttavat monet tekijät, kuten raiteen epätasaisuus, kisko- ja pölkkytyyppi sekä kuljetuskaluston ja tukikerroksen kunto [34].



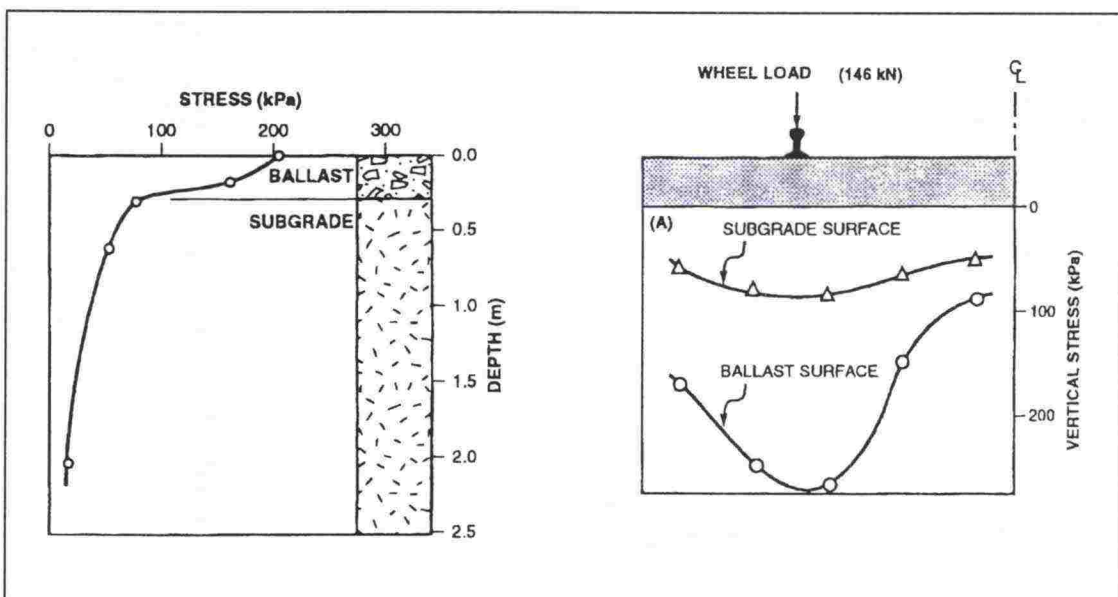
Kuva 3.13. Mitatut ja mallinnetut pystysuuntaiset jännitykset ratarakenteessa 250kN akseli-kuormalla [26].

Kuvassa 3.14 nähdään Kouvola – Koria rataosuudelta mitattuja eri akselipainojen aiheuttamia jännityksiä 0,45 metriä ratapölkyn alapuolella. Kuvaan on piirretty myös mallinnettu akselipainon vaikutus puristavaan jännitykseen.



Kuva 3.14. Mitattujen ja mallinnettujen jännitysten riippuvuus akselipainosta 0,45 metriä ratapölkyn alapuolella [26].

Geotrack-mallilla saadaan 146 kN pyöräkuormalla (= 292 kN akselikuorma) kuvan 3.15 mukainen jännitysjakauma. Sen mukaan jännitystaso routalevyn asennussyvyydellä 30 cm paksun sepelikerroksen alla on noin 90 kPa [43]. Ero Kouvola-Koria rataosuuden mittausten perusteella tehtyihin mallinnuksiin selittyy ainakin suurilta osin Geotrack-mallissa käytetyllä pienemmällä ratapölkkyvälillä.



Kuva 3.15. Jännitystaso syvyyden suhteen Geotrack-mallin mukaan. Mallinnuksessa on käytetty puuratapölkkyä ja 495 mm pölkkyväliä [43].

Ruotsissa selviteltiin, kuinka paljon akselipainon korottaminen 250 kN:sta 300 kN:iin kasvattaa raidesepeliin ja routalevyyn kohdistuvaa kuormitustasoa [1, 3]. Taulukossa 3.6 on esitetty mallinnuksen tuloksena saadut raidesepeliin kohdistuvat kuormitukset. Routalevyyn kohdistuvaa kuormitusta arvioitiin olettamalla jännityksen jakautuvan tukikerroksessa 2:1. Tällainen oletus jännityksen jakautumisesta on ylioptimistinen, jolloin routalevyyn kohdistuvien kuormitustasojen osalta päädytään epävarmalle puolelle. Todellisuudessa jännitys jakaantuu ainakin osittain sepelirakeiden välisiä ketjuja pitkin [24], jolloin kuormitustaso levyn pinnassa on ketjun kohdalla paikallisesti tasaisen jakautumisen oletuksella laskettua kuormitustasoa suurempi.

Taulukko 3.6. Kvasistaattinen ja dynaaminen kuormitus tukikerroksessa ja routalevyssä 250 kN:n ja 300 kN:n akselikuormilla kiskotyypiltään UIC 60 betoniratapölkkyraiteessa, jossa ratapenger on jäykkä tai joustava pehmeä. Routalevyn syvyys on 0,3 m ratapölkyn alapinnasta. Dynaaminen kuormitus on laskettu kertomalla kvasistaattinen kuormitus kertoimella 1,3 tukikerroksen osalta ja kertoimella 1,2 routalevyn osalta [1, 3].

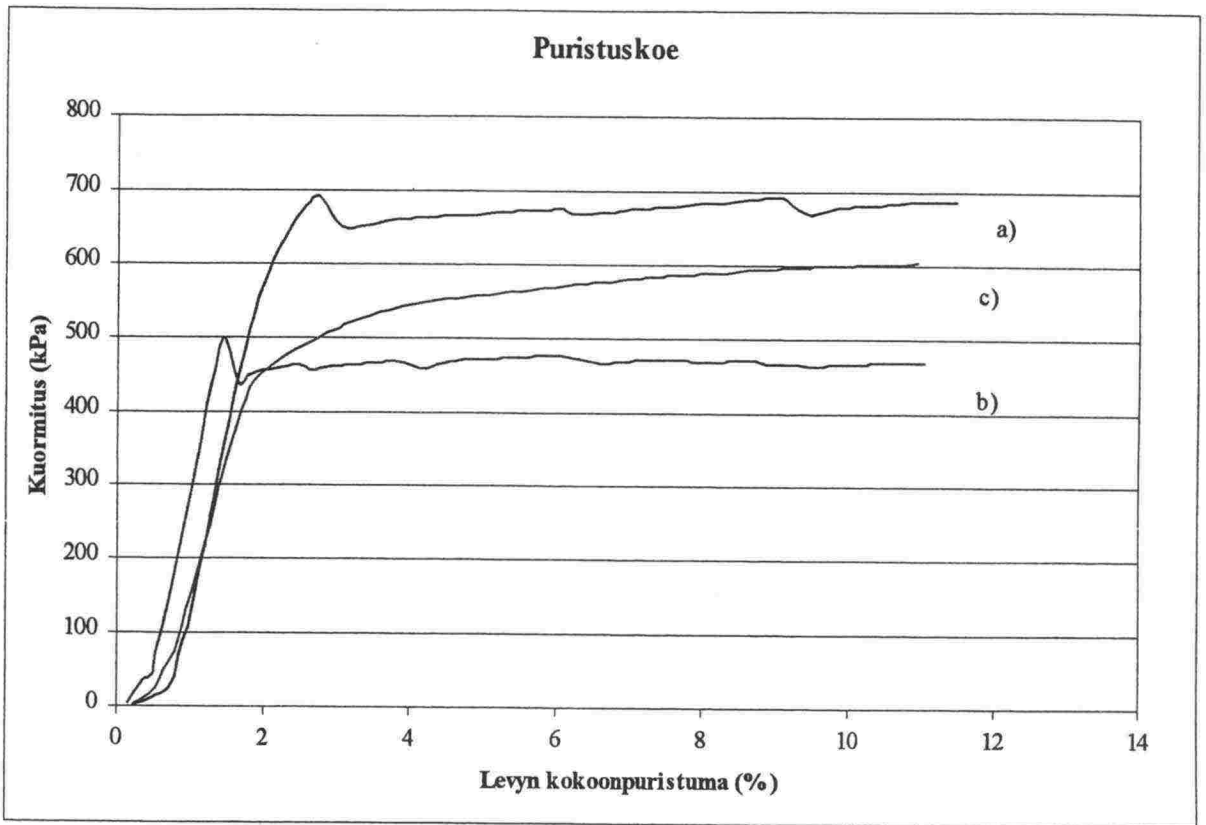
AKSELIKUORMA	250 kPa		300 kPa	
	kvasistaattinen kuormitus / kPa	dynaaminen kuormitus / kPa	Kvasistaattinen kuormitus / kPa	dynaaminen kuormitus / kPa
TUKIKERROS				
jäykkä penger	234	304	283	368
pehmeä penger	219	285	264	343
ROUTALEVY				
jäykkä penger	72	86	86	103
pehmeä penger	65	69	78	94

Eristelevyn kestävyyttä ratarakenteessa kohdistuvalle mekaaniselle kuormitukselle voidaan arvioida puristuslujuuden ja syklisen rasituksen kestävyysperusteella.

3.4.2 Puristuslujuus

Tyypillisiä XPS-levyjen puristuskokeissa saatavia jännitys-kokoonpuristumakäyriä on esitetty kuvassa 3.16. Alkupuristuman (kuormitus < 50 kPa) jälkeen levyn käyttäytyminen on kimmoista (3.16 a, 3.16 c) tai lineaarisesti kimmoista (3.16 b). Kun myötöraja ylitetään, levyn muodonmuutoksen vastustuskyky alenee voimakkaasti, vaikka varsinaista murtoa ei olisi saavutettu (3.16 c). Tästä syystä levyn puristuslujuutta määritettäessä huomioidaan EN 826:n [44] mukaisesti puristuslujuuden sijasta 10 % kokoonpuristumaa vastaava puristusjännitys. Murtolujuus saavutetaan yleensä alle 3 % kokoonpuristumalla, sikäli kun selvä murtokohta on havaittavissa.

Polystyreenilevyn vaurioituminen alkaa, kun mekaaninen rasitus ylittää myötörajan. Kokoonpuristuminen alkaa levyn heikoimman kohdan soluseinämien murtumisella. Levy alkaa puristua kokoon ilman selvää murtumista. Vaurioitunut alue laajenee edeten heikoimman kohdan ympäristöön [11].



Kuva 3.16. Tyypillisiä XPS-levyn jännitys-kokoonpuristumakäyriä. a) kimmainen käyttäytyminen, selvä murtokohta (693 kPa), b) lineaarisesti kimmainen vaihe välillä 50-480 kPa, selvä murtokohta (500 kPa), c) kimmainen käyttäytyminen, ei selvää murtokohtaa. Tapaus a) on tyypillinen Finnfoam-levyllä, b) Solimate-levyllä ja c) Styrodur-levyllä sekä harvinaisempi Finnfoam-levyllä.

Kun solurakenne on vaurioitunut, veden absorptio levyyn moninkertaistuu, koska tällöin vesi kykenee tunkeutumaan levyyn myös nestemäisenä. Vesi varastoituu solujen välisten huokosten lisäksi nyt myös vaurioituneisiin soluihin. EPS-levylle on todettu, että kosteuspitoisuuden kasvu ei vaikuta heikentävästi levyn käyttäytymiseen puristavan kuormituksen alla. Kostean levyn puristuslujuus on todettu jopa hieman kuivaa levyä paremmaksi, minkä on arveltu johtuvan solujen sisään diffusoituneen vesihöyryn materiaalia jäykentävästä vaikutuksesta [11, 19]. On kuitenkin muistettava, että lisäys kosteuspitoisuudessa lisää levyn lämmönjohtavuutta.

Lämpötilan alentuessa muovimateriaalin puristuslujuus yleisesti ottaen kasvaa [11]. Tämä on todettu erityisesti myös EPS:lle. Alle 0 °C lämpötilassa puristuslujuuden on todettu olevan noin 20 % huoneenlämpötilassa mitattua arvoa suurempi. Vastaavasti +45 °C lämpötilassa puristuslujuus on todettu noin 20 % em. arvoa pienemmäksi [19]. Toisaalta Duskov [11] on todennut, että alhainen lämpötila tai altistuminen jäätymissulamissykleille ei merkittävästi vaikuta EPS:n mekaaniseen käyttäytymiseen.

Tierakenteeseen asennetussa XPS-levyssä on todettu huomattavaa puristuslujuuden heikkenemistä ajan myötä, toisin kuin EPS-levyssä. Puristuslujuuden heikkeneminen on todettu ajan ja siten myös kuormitusmäärän suhteen varsin lineaariseksi [35]. Tällainen tulos on yllättävä, sillä puristuslujuuden voidaan olettaa kasvavan levyn vanhenemisen

myötä (vrt. kappale 5.4.2). Ilmiö johtuu oletettavasti siitä, että CFC-kaasulla paisuteissa levyissä ilman tyyppi ja happi diffusoituvat levyn soluihin nopeammin kuin solujen sisältämä CFC-kaasu diffusoituu soluista ulos (vrt. kappale 3.2). Tällöin seurauksena on solupaineen väliaikainen kasvu. Kun CFC-kaasu diffusoituu myöhemmin hitaasti soluista ulos, solupaine ja siten myös puristuslujuus alenevat.

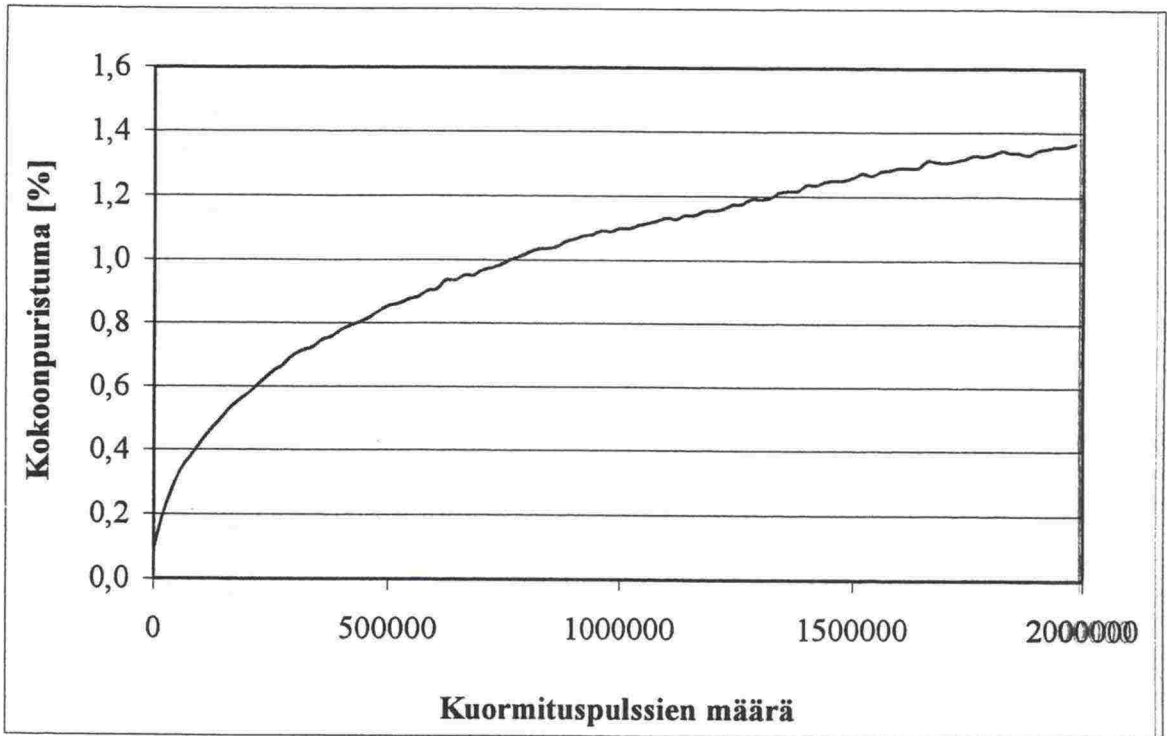
3.4.3 Syklisen kuormituksen kestävyys, väsymiskestävyys

Levyyn kohdistuu käyttöiän aikana raidesepelin välityksellä miljoonia kuormitus-pulseja yli kulkevien junien akseleista. Näin ollen toistuvan kuormituksen kestävyys lienee routalevyn ominaisuuksista tärkein, sillä se mahdollistaa levyn eristävyys säilymisen.

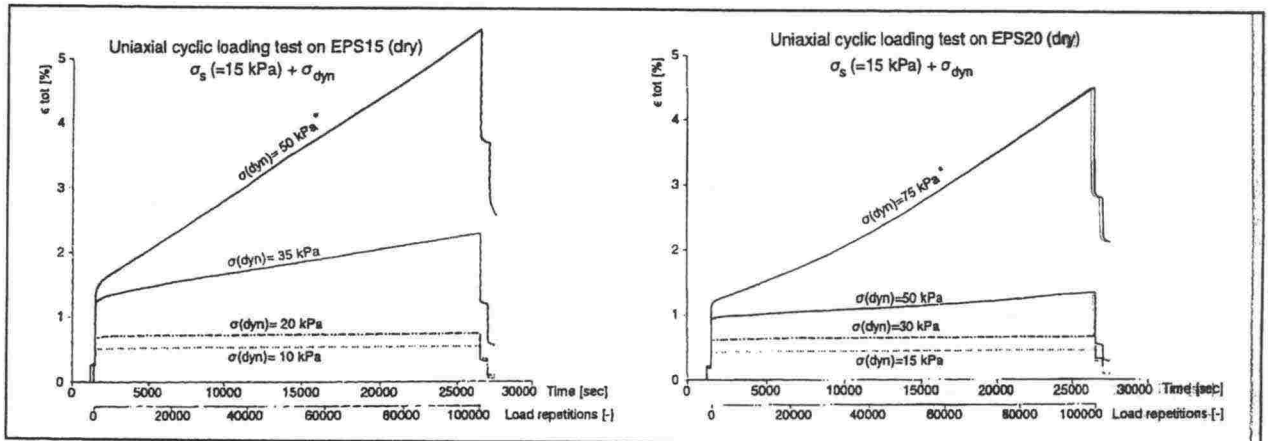
Malmбанalta otetuista näytteistä lähes kaikista havaittiin ratapölkyn suuntaisia veto-halkeamia levyjen alapinnoilla. Syyksi tähän todettiin alusrakenteen epätasainen painuminen sekä levyjen alimitoitus sykliselle kuormitukselle. Tutkimuksen perusteella akselipainon korottaminen 25 tonnista 30 tonniin edellyttää 0,3 metrin syvyydelle ratapölkyn alapinnasta asennettujen levyjen uusimista viiden vuoden sisällä. Ennen vuotta 1985 Malmбанalle asennetut eristelevyt on sijoitettu 0,2 metriä syvemmälle ja niiden oletetaan kestävän akselipainon korotus em. paremmin. [1, 2]

Syklistä kuormitusta simuloidaan laboratoriokokeella, jossa levyä kuormitetaan sileiden teräslevyjen välissä 2 miljoonaa kertaa. Kuormitusjärjestelyissä on eri maiden välillä pieniä eroja, mutta testimenetelmä yhdenmukaistunee XPS-levyjen testausta käsittelevän normin [36] valmistumisen myötä. RHK:n laadunvalvontakokeissa käytetään menetelmää [47], jossa routalevyn päällä olevien ratarakenteiden painoa kuvastava staattinen kuormitus on 10 kPa ja 4 Hz taajuudella toistuva syklinen kuormitus 190 kPa. Tällöin kokonaiskuormitukseksi kuormituspulssin kohdalla saadaan 200 kPa. Levyn väsymiskestävyyttä arvioidaan kokeessa syntyvällä pysyvällä kokoonpuristumalla, jonka tulee olla alle 5 %. Kuvassa 3.17 on esitetty tyypillinen koekappaleen kokoonpuristuma kuormituspulssien määrän funktiona.

Duskov [11] on tutkinut EPS:n käyttäytymistä syklisessä kuormituskokeessa eri kuormitustasoilla. Kuvassa 3.18 on esitetty EPS 15:n ($\rho = 15 \text{ kg/m}^3$) ja EPS 20:n ($\rho = 20 \text{ kg/m}^3$) kokoonpuristumat kuormituskertojen määrän funktiona. Kuvasta havaitaan, kuinka tietyllä kuormitustasolla levyyn alkaa muodostua huomattavia pysyviä muodonmuutoksia. Tutkimuksessa kuormitettiin myös kosteutta imeneitä sekä jäätymis-sulamissyklejä kokeneita näyte-kappaleita. Tulosten pohjalta todettiin, että jäätymisen, veden absorptio tai niiden yhdistelmä eivät vaikuta heikentävästi EPS:n mekaaniseen käyttäytymiseen.



Kuva 3.17. Tyypillinen koekappaleen kokoonpuristuma väsymiskokeessa kuormituspulssien lukumäärän suhteen.



Kuva 3.18 EPS 15:n ja EPS 20:n kokoonpuristumat kuormituskertojen määrän funktiona. σ_s on kuormituksen staattinen osa ja σ_{dyn} syklinen osa [11].

4 NÄYTTEENOTTO ROUTALEVYISTÄ JA NÄYTTEIDEN LABORATORIOTUTKIMUKSET

4.1 Tavoite

Ratarakenteeseen asennetuista routalevyistä otettiin näytepaloja, joihin kohdistettujen laboratoriotutkimusten perusteella oli tarkoitus arvioida jo asennetun routalevykannan kuntoa sekä levyjen eristävyys säilymistä nykyisten akselikuormien synnyttämissä kuormitusolosuhteissa.

4.2 Näytteenotto

4.2.1 Näytteenottokohteiden valinta

Näytteenottokohteiden valinnassa pyrittiin saamaan otos kunkin kolmen levyvalmistajan eri vuosina valmistamista levyistä. Näin toimittiin, koska tavoitteena oli luoda käsitys nimenomaan asennetun levykannan keskimääräisestä kunnosta, ei niinkään tietyn tuotantovuoden tai valmistajan levyistä erityisesti. Keskimääräisestä kunnosta huomattavasti poikkeavan levyn tuotantoerää voitaisiin jatkotutkimuksissa selvittää tarkemmin.

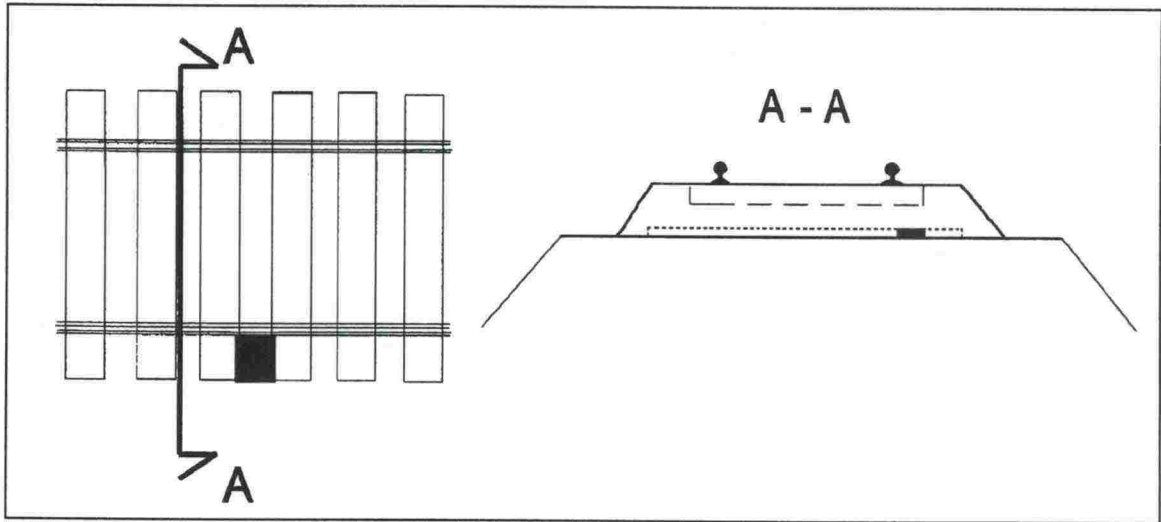
Routalevyjen asennuskohteita kartoitettaessa todettiin, että levyjen asennustietoja ei ole kaikilta osin koottuna. Paikallistasollakin asennustiedot olivat hankalasti löydettävissä ja monilta osin puutteellisia. Tiedot vanhemmista, 1980-luvulla tehdyistä levyasennuksista olivat varsin vähäisiä. Ongelmallista oli myös se, että tallennetut routalevyjen asennusta koskevat dokumentit olivat yleensä tehtyjä eristysuunnitelmia, eivätkä suunnitelmat täysin vastanneet todellisia eristettyjä kohteita. Ääriesimerkkinä voidaan pitää tapausta, jossa vuonna 1992 routaeristetty kohde seulottiin ja eristettiin uudestaan vuonna 1994, koska päätöksentekijöillä ei ollut tietoa aiemmasta eristyksestä.

Edellä esitetyn perusteella näytteenotto päätettiin keskittää Riihimäen ja Luumäen väliselle rataosuudelle, missä perusparannus ja sen yhteydessä routalevyjen asennus käynnistyi vuonna 1989 Luumäeltä ja eteni länteen päin. Osuuden valintaa tutkimuskohteeksi puolsivat myös suuri vuotuinen levyjä rasittava liikennekuormitus sekä se, että näytteenottoa keskittämällä pystyttiin vertailemaan eri-ikäisiä näytekappaleita keskenään.

Ratarumpitutkimukseen liittyvien instrumentointitöiden yhteydessä Toijala – Viiala rataosuudella km 152+695 otettiin lisäksi kolmesta vierekkäisestä routalevystä puolikkaat eli levyn päästä raiteen puoliväliin ulottuvat noin kaksi metriä pitkät näytepalat.

4.2.2 Näytteenottomenetelmä

Näyte otettiin ratapölkkyjen välistä kiskon ja ratapölkyn pään väliseltä alueelta (ks. kuva 4.1), jolloin näyte koko oli noin 35 cm x 35 cm. Näytteet otti kahden hengen työpari, jossa toinen toimi turvahenkilönä. Kaivu tehtiin soralapion, rautakangen ja hakun avulla. Kaivun loppuvaiheissa käytettiin pienempää puutarhalapiota. Levyn asennussyvyys kiskon alapinnasta mitattiin rullamitalla. Levy sahattiin irti lyhennetyllä oksasahalla ja kammettiin sahauksen jälkeen irti lapion terällä. Irrotettu näyte kelmutettiin välittömästi haihtumisen välttämiseksi.



Kuva 4.1. Routalevynäytteen ottokohta.

4.2.3 Otetut näytteet

Näytteitä otettiin Riihimäen ja Luumäen väliseltä rataosuudelta taulukossa 4.1 esitetyiltä kilometrilukemilta ja raiteilta yhteensä 12 kappaletta. Taulukosta käy ilmi myös levyjen asennussyvydet, asennusvuodet, levyvalmistajat ja levypaksuudet sekä levyn alapuolinen maalaji. Miltei kaikissa kohteissa levyn alapuolelle oli jäänyt sepelirakeita ja siten myös levyjen alapintoihin oli muodostunut painaumia. Kahdessa kolmasosassa kohteista levyn asennussyvyys oli pienempi kuin nykyisin sallittu kv-55 cm. Tosin kolmessa viidestä uusimmasta asennuskohteesta asennussyvyys täytti em. vaatimuksen. Näytteet on esitetty kuvissa 4.2 – 4.5.

Taulukko 4.1. Otettujen näytteiden sijainti Riihimäki – Luumäki rataosuudella, levyjen asennussyvytykset (etäisyys korkeusviivasta levyn yläpintaan), asennusvuodet, levyvalmistajat, levypaksuudet sekä levyn alapuolinen maalaji. Merkintä "?" levyjen asennusvuoden kohdalla tarkoittaa, että asennusvuodesta ei ole tarkkaa tietoa. Merkintä "sepeli" tarkoittaa, että levyn alapintaan on painautunut sepelirakeita, eli levyn asennuksen yhteydessä tukikerrosta ei ole kokonaan poistettu.

Raide	Km	Asennus-syvyys	Asennus-vuosi	Levyvalmistaja	Paksuus	Levyn alap. maa
P	114+000	Kv-59	1997	Finnfoam	80	Sepeli
P	114+150	Kv-56	1996	Finnfoam	80	Sepeli
P	173+750	Kv-58	1994	Basf	80	Sora
P	201+738	Kv-46	1992	Dow	80	Sepeli
P	206+570	Kv-51	1994	Basf	80	Sepeli
P	236+400	Kv-45	1989-90 ?	Finnfoam	120	Sepeli
E	138+740	Kv-48	1995	Dow	60	Sepeli
E	198+670	Kv-50	1992	Dow	80	Sepeli
E	201+440	Kv-50	1991	Dow	80	Sepeli
E	207+200	Kv-57	1989-90 ?	Finnfoam	100 *)	Sepeli
E	209+060	Kv-45	1989-90 ?	Finnfoam	100 *)	Sora
E	238+040	Kv-46	1989-90 ?	Finnfoam	100	Sepeli

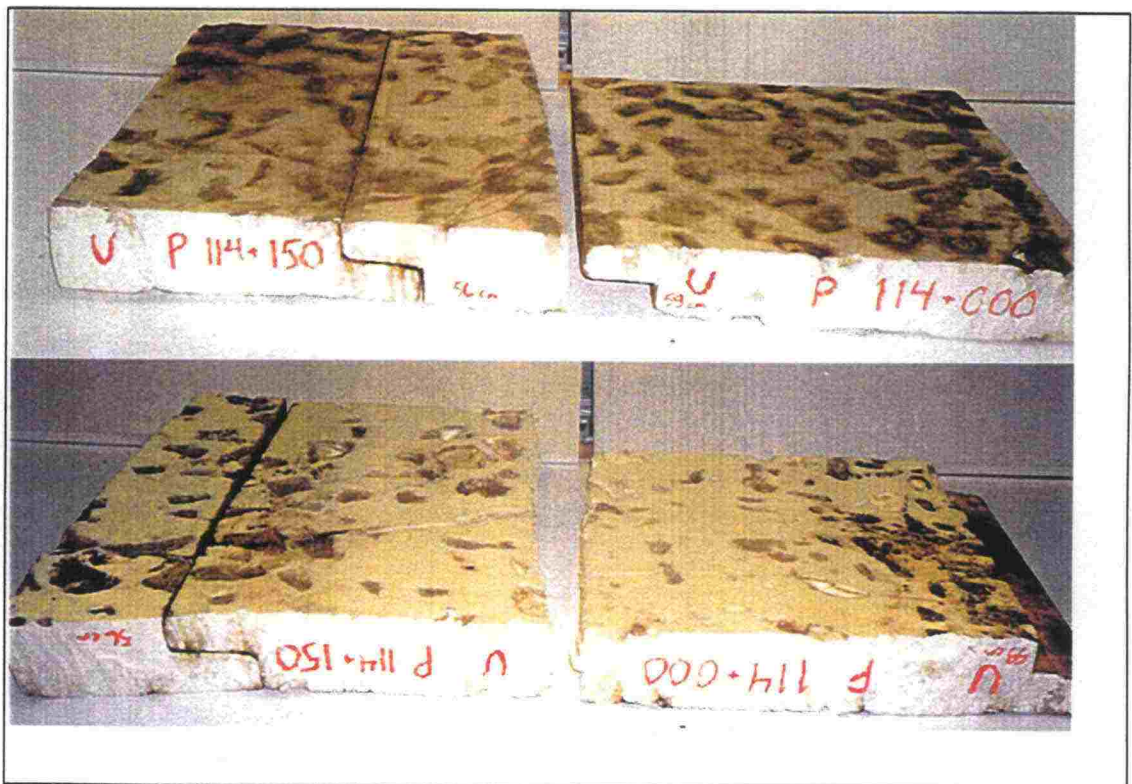
*) Levyjen yläpinnassa oli kuitukangassuojaus.



Kuva 4.2. Dowin valmistamista levyistä otetut näytteet kuvattuna sekä ylä- (yllä) että alapinnastaan (alla).



Kuva 4.3. Otetut näytteet Basfin valmistamista levyistä kuvattuna sekä ylä- (yllä) että alapinnastaan (alla).



Kuva 4.4. Otetut näytteet Finnfoamin vuonna 1996 ja 1997 valmistamista levyistä kuvattuna sekä ylä- (yllä) että alapinnastaan (alla).



Kuva 4.5. Otetut näytteet Finnfoamin oletettavasti vuonna 1989-90 valmistamista levyistä kuvattuna sekä ylä- (yllä) että alapinnastaan (alla).

Asennustietojen puutteellisuuden takia eristettä etsittiin turhaan kuudesta, taulukossa 4.2 esitetyistä kohteista, jotka routaeristys suunnitelmassa oli määrätty eristettäväksi. Taulukossa on esitetty myös routaeristys suunnitelmassa kohteille määrätty eristepaksuudet.

Taulukko 4.2. Kohteet, joista routalevyjä ei löytynyt routaeristys suunnitelmassa määrätystä poiketen.

Raide	Km	Kaivussyvyys	Suunnitelman mukainen paksuus	Suunniteltu asennusvuosi
P	201+440	Kv-80	*)	
P	218+990	Kv-105	120	1989
P	219+620	Kv-75	60	1989
P	229+570	Kv-85	120	1989
E	218+990	Kv-90	120	1989
E	219+620	Kv-80	60	1989
E	229+570	Kv-100	120	1989

*) Kohde kaivettiin, koska asennustiedoissa ei ollut merkintää raiteesta. Levy löytyi eteläisestä raiteesta.

4.3 Näytteiden laboriotutkimukset

4.3.1 Tutkimusmenetelmät

Silmämääräinen arviointi

Otetujen näytepalojen halkeilua ja sepelirakeiden painaumuksia arvioitiin silmämääräisesti jo radalla. Laboratoriossa näytteet valokuvattiin (ks. kappale 4.2.3) sekä ylä- että alapinnaltaan. Näytteiden pinta puhdistettiin hienontuneesta kiviaineksesta, jonka jälkeen näytteet punnittiin ja kelmutettiin uudelleen.

Lämmönjohtavuus

TTKK/Talonrakennustekniikka määrittä viidestä radasta otetusta näytteestä lämmönjohtavuudet lämpövirtalevymenetelmään (heat flow meter method) pohjautuvalla LaserComp Fox 304- merkkisellä mittalaitteella normin ISO 8301 mukaisesti. Lämpövirtalevymenetelmässä näytekappale asetetaan kahden laitteeseen rakennetun ja lämmönjohtavuudeltaan tunnetun ohuen referenssilevyn väliin. Lämmittimen ja jäähdyttimen avulla aikaansaadaan lämpövirta näytelevyn ja referenssilevyjen läpi. Näytekappaleen lämmönjohtavuus on mahdollista laskea referenssilevyjen ylä- ja alapinnoilta mitattujen lämpötilojen sekä referenssimateriaalin lämmönjohtavuuden perusteella. Valmistajan mukaan laite määrittää näytteen lämmönjohtavuuden 1 %:n tarkkuudella.

Lämmönjohtavuudet määritettiin sekä +10 °C että -5 °C keskilämpötilassa. Molemissa tapauksissa lämmittimellä ja jäähdyttimellä luotu lämpötilaero oli 20 °C. Lämmönjohtavuudet mitattiin kelmutetuista näytteistä, koska valmistajan ilmoituksen mukaan kelmun vaikutus mittaustulokseen on merkityksellinen. Lämmönjohtavuus mitattiin radasta otettujen näytteiden lisäksi kolmesta uudesta levystä +10 °C keskilämpötilassa. Näiden mittausten tulokset on raportoitu kappaleessa 5.6.

Sepelirakeiden tunkeutumisesta näytelevyjen pintoihin syntyneiden painanteiden merkitystä mittauksessa saatavaan lämmönjohtavuuteen pohdittiin usealta kannalta.

Todettiin, että pienehköt painanteet, joiden sisältämä ilma pysyy mittauksen ajan paikallaan toimien eristeenä, pienentävät levyn lämmönjohtavuutta todellisesta. Vastaavasti pääteltiin, että mikäli painanteet ovat riittävän suuria lämpökonvektion muodostumiseksi, mittauksissa saadaan levyn todellista lämmönjohtavuutta suurempia arvoja. Koska syntyvää ilmiötä ei pystytty yksiselitteisesti rajaamaan kumpaankaan em. tapaukseen, päätettiin painaumien vaikutuksen selvittämiseksi mitata lämmönjohtavuus yhdestä uudesta levystä sekä uudesta levystä, johon oli keinotekoisesti muodostettu sepelirakeiden tunkeutumista jäljitteleviä painaumuksia (ks. kappale 5.6). Lisäksi yhdestä radasta otetusta näytteestä mitattiin lämmönjohtavuus siten, että levyn painaumat tasoitettiin kuivalla tasarakeisella hiekalla.

Vesipitoisuus

Näytteiden vesipitoisuus määritettiin sekä tilavuus- että painoprosentteina. Näytteet kuivatettiin 65 °C lämpötilassa tasaisin väliajoin tarkastuspunnituksia suorittaen. Näytteistä kontrolloitiin punnituksilla myös kelmutuksen aikana tapahtunutta haihduntaa ja havaittu vähäinen haihdunta huomioitiin vesipitoisuuksien laskennassa.

Näytteiden tilavuus määritettiin upotuskokeessa Arkhimeden lakia soveltaen. Näyte-kappale upotettiin veteen kokonaan, jolloin kappaleeseen kohdistui noste, jonka suuruus oli kappaleen tilavuutta vastaavan vesimäärän painovoiman suuruinen. Kappaleen upoksissa pitämiseksi vaadittu voima mitattiin vaa'alla upotusastian pohjaan kiinnitettyjen rullapyörien kautta kulkevan narun välityksellä. Vaa'an lukema vastasi kappaleeseen kohdistuvan nosteen ja kappaleen massan erotusta.

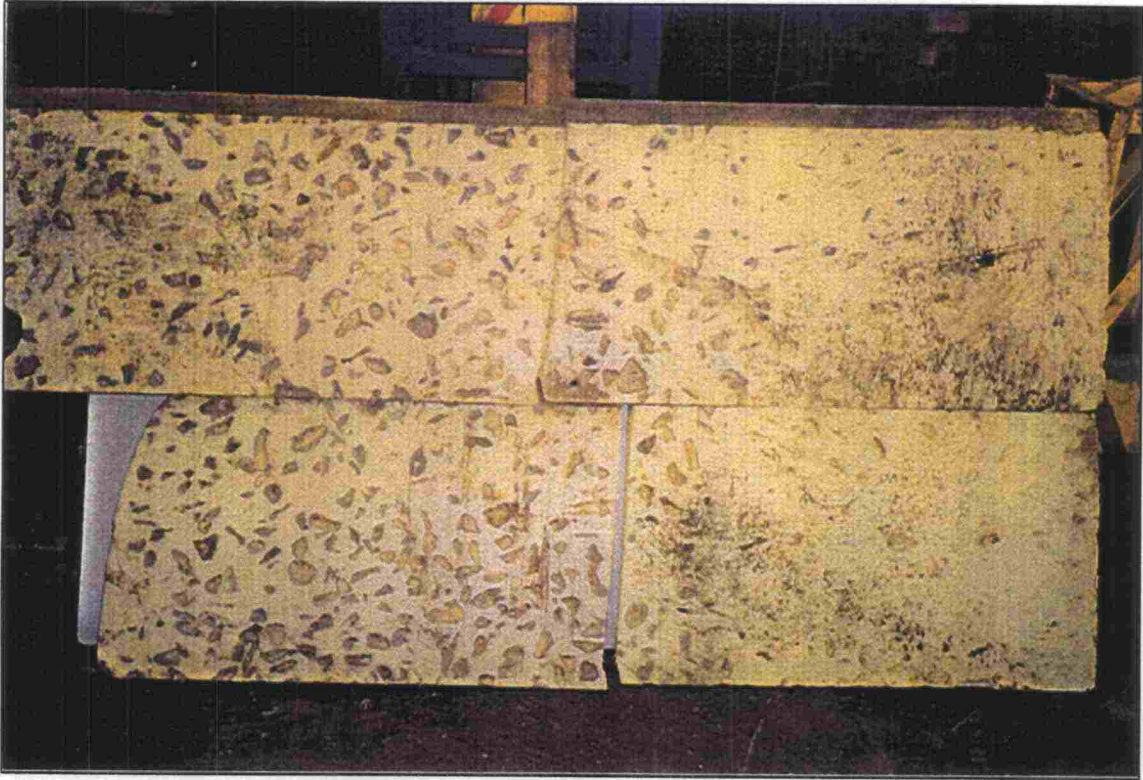
4.3.2 Mekaaniset vauriot

Näyte-kappaleet jakaantuivat kuntonsa puolesta selkeästi kahteen ryhmään. Selvästi muita heikkokuntoisempia olivat Finnfoamin luultavasti vuosina 1989-90 valmistamat levyt, jotka kaikki olivat pahoin vettyneitä. Näitä näytteitä oli yhteensä neljä kappaletta, joista kahden päälle oli asennettu suojakangas. Kaikkein huonoimmassa kunnossa eriste oli km 236+400 pohjoisella raiteella, missä levy oli ratapölkyn alla olevalta osaltaan täysin tuhoutunut (ks. kuva 4.6).



Kuva 4.6. Huonokuntoisin otetuista näytteistä (km 236+400 pohj.). Etualalla oleva näytteen sivu sijaitsi ratapölkyn reunalla. Ratapölkyn alla olevalta osalta levy oli täysin tuhoutunut.

Kaikkien näytekappaleiden yläpinnoissa oli selviä sepelirakeiden tunkeutumisen muodostamia painaumia (ks. kuvat 4.2-4.5). Paineumat olivat syvyydeltään ja alaltaan vaihtelevia syvimpien ulottuessa noin 20 mm levyn sisään. Kymmenessä näytteessä oli painaumia myös levyn alapinnalla johtuen levyjen asennuksen yhteydessä niiden alle jääneistä sepelirakeista. Vain kahdessa näytteenottokohteessa levyn alla oli pelkkää soraa, ei sepelirakeita, eikä siten levyn alapinnassa myöskään painaumia. Nämä levyt olivat säilyneet myös halkeilematta. Paineumien jakautumista levyn pituussuunnassa voidaan tarkastella kuvasta 4.7, joka on peräisin Toijala – Viiala rataosuudella sijainneesta ratarumpututkimuskohteesta otetuista routalevyistä. Levyn alapinnasta otetusta kuvasta nähdään, että levyn päässä (kuvan oikea reuna) painaumat ovat hyvin vähäisiä. Tämä johtuu luonnollisesti siitä, että levyyn kohdistuva liikennekuormitus on huomattavasti vähäisempi levyn päissä verrattuna raiteen keskiosiin.



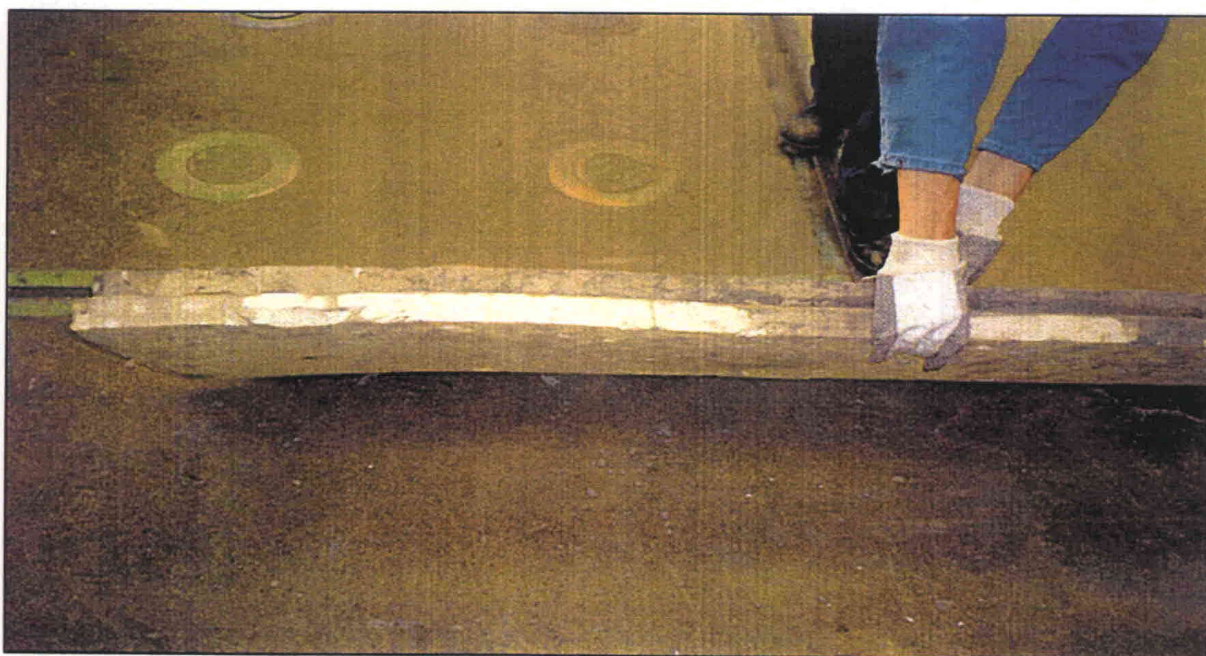
Kuva 4.7. Painaumien jakaantuminen levyn pituussuunnassa. Levyt ovat tyypiltään Finnfoam VR-80 ja otettu Toijala – Viiala rataosuuden ratarumpututkimuskohteesta km 152+695. Levyjen päät ovat kuvan oikeassa reunassa ja levyt on katkaistu raiteen keskikohdilta.

Pinaumien lisäksi toinen vaurioitumisen muoto olivat sekä raiteen suuntaiset että raidetta vastaan kohtisuorat halkeamat levyjen alapinnoilla. Parempikuntoisistakin näytelevyistä puolet (neljä kahdeksasta) olivat halkeilleet. Molemmat Basfin valmistamat levyt olivat säilyneet halkeamatta. Toisaalta 1996 ja 1997 asennettuihin Finnfoamin levyihin oli halkeamia jo muodostunut. Dowin valmistamista neljästä näytekappaleesta kaksi oli halkeillut melko pahoin (ks. kuva 4.8). Raiteen suuntaisia halkeamia oli havaittavissa myös ratarumpututkimuskohteesta otetuissa levyissä (ks. kuva 4.7).

Toijala – Viiala rataosuuden ratarumpututkimuskohteesta otetuista levyistä oli havaittavissa myös levyn taipumista raidetta vastaan kohtisuorassa suunnassa (ks. kuva 4.9). Raiteen alla oleva osa levystä (kuvassa oikealla) on taipunut liikennekuormituksen vaikutuksesta levyn päätyosaa (kuvassa vasemmalla) alemmaksi.



Kuva 4.8. Halkeilleet Dowin valmistamat levyt (km 201+738 pohj. ja km 198+670 E).



Kuva 4.9. Routalevyyn ratarakenteessa muodostunut taipuma. Levyn pääty (eristyksen ulko-reuna) on kuvan vasemmassa reunassa ja levyn yläpinta kannattelijan puolella. Liikenne-kuormituksen alaisena ollut osa alkanee kannattelijan käsien kohdalta.

4.3.3 Vesipitoisuudet ja lämmönjohtavuudet

Tulokset näytteistä mitatuista vesipitoisuuksista ja lämmönjohtavuuksista on koottu taulukkoon 4.3. Käyttämättömien levyjen mittaustulokset on esitetty kappaleessa 5.6. Erillinen raportti lämmönjohtavuuden mittauksesta on liitteenä 2.

Taulukko 4.3. Radasta otetuista näytteistä mitatut vesipitoisuudet paino- ja tilavuusprosentteina sekä lämmönjohtavuudet 10 °C ja -5 °C keskilämpötilassa. Lisäksi yhden näytteen lämmönjohtavuus on mitattu -5 °C keskilämpötilassa siten, että levyn painaumat on tasoitettu kuivalla hiekalla.

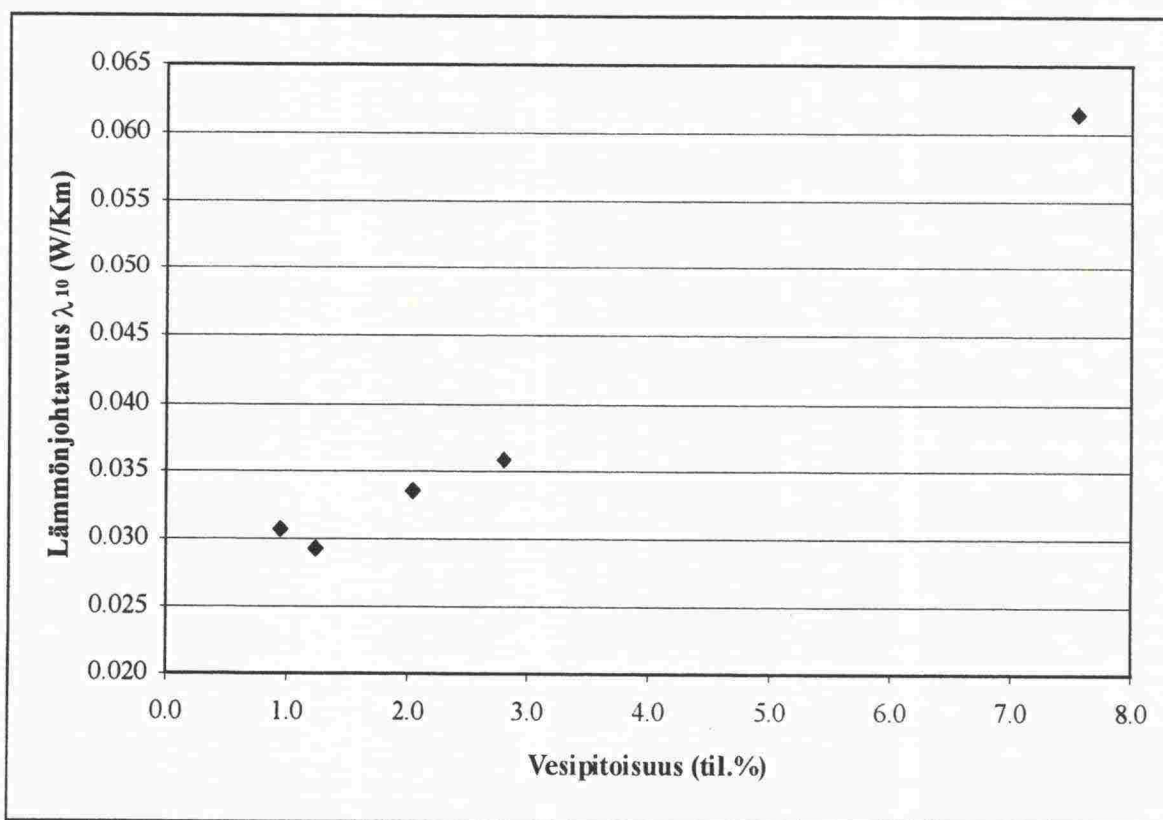
Näyte	Valmistaja	Asennus-vuosi	w [p%]	w [til.%]	w:n kasvu [til.%/ a]	λ_{10} [W/ Km]	λ_{-5} [W/ Km]	λ_{-5} hiekalla [W/ Km]
P 114+000	Finnfoam	1997	22	0,9	0,31	0,0307	0,0298	-
P 173+750	Basf	1994	26	1,2	0,21	0,0293	0,0290	-
P 201+738	Dow	1992	33	2,0	0,25	0,0336	0,0337	-
E 198+670	Dow	1992	43	2,8	0,35	0,0358	0,0375	0,0389
E 207+200	Finnfoam	1989-90 ?	130	7,6	0,76	0,0615	0,0741	-
P 114+150	Finnfoam	1996	33	1,6	0,39	-	-	-
P 206+570	Basf	1994	63	3,4	0,57	-	-	-
P 236+400	Finnfoam	1989-90 ?	205	21,8	2,18	-	-	-
E 138+740	Dow	1995	49	2,6	0,53	-	-	-
E 201+440	Dow	1991	38	2,0	0,23	-	-	-
E 209+060	Finnfoam	1989-90 ?	177	13,3	1,33	-	-	-
E 238+040	Finnfoam	1989-90 ?	113	10,0	0,99	-	-	-

Vesipitoisuusmittausten perusteella näytekappaleet on jaettavissa kahteen ryhmään, kuten edellisessä kappaleessa esitetyn silmämääräisen arvioinnin nojalla oli odotettavissa. Huomattavasti muita näytteitä enemmän kosteutta olivat imeneet oletettavasti vuosina 1989-90 asennetut Finnfoamin levyt, joista määritetyt kosteuspitoisuudet sijoittuivat välille 7,6-21,8 tilavuusprosenttia. Kyseisen näyteryhmän levyistä kuivimasta, kosteudeltaan 7,6 tilavuusprosentin levystä mitattu lämmönjohtavuus oli sekin noin kaksinkertainen verrattuna kuivemman näyteryhmän levyistä mitattuihin lämmönjohtavuuksiin. Mitattu lämmönjohtavuus, $\lambda_{10} = 0,0615$, on huomattavasti suurempi kuin vesipitoisuuden kasvun vaikutuksesta lämmönjohtavuuteen kappaleessa 3.3.3 esitettyjen arvioiden pohjalta voitiin olettaa. Tämän vuoksi onkin mahdollista, että levyn lämmönjohtavuus oli jo rataa asennettaessa huomattavan korkea. On syytä huomata, että kaikkein kostunein näytekappale oli kosteuspitoisuudeltaan kolminkertainen em. kappaleeseen nähden, joten sen lämmönjohtavuus voidaan olettaa vielä huomattavasti suuremmaksi. Neljän kosteimman levyn lämmönvastus voidaan todeta selvästi heikommaksi kuin mihin routaeristuksen mitoituksessa varaudutaan. Näillä levyillä eristetyissä kohteissa ei voida välttyä routimishaitoilta. Oleellista olisikin selvittää heikkolaatuisen tuotannon laajuus ja asennuskohteet.

Kahdeksan vähiten vettä imeneen näytekappaleen kosteuspitoisuus vaihteli välillä 0,9-3,4 tilavuusprosenttia. Vastaavasti tasaiseksi oletettu levyjen vuotuinen kosteuspitoisuuden lisäys vaihteli välillä 0,21-0,57 tilavuusprosenttia keskiarvon ollessa 0,36 tilavuusprosenttia. Tämä on kohtuullisen lähellä kappaleessa 3.3.2 esitettyä seuranta-tutkimuksiin perustuvaa arviota 0,25-0,30 tilavuusprosentin kosteuspitoisuuden vuotuisesta kasvusta. Näin on etenkin kun huomioidaan, että tämän tutkimuksen näytelevyt olivat olleet radassa suhteellisen lyhyen ajan ja on ilmeistä, että kosteuspitoisuus

lisääntyy tasaisesta oletuksesta poiketen tietylle, mahdollisesti 0,5-1,0 tilavuusprosentin tasolle hyvin pian asennuksen jälkeen. Näiden kahdeksan, mitä ilmeisimmin nykyiset laatuvaatimukset täyttävän levyn voidaan todeta vastustaneen kosteuden imeytymistä tyydyttävällä tavalla, joskin hajonta on melko suuri.

Mitattujen nätekappaleiden lämmönjohtavuus (mitattuna +10 °C keskilämpötilassa) suhteessa kosteuspitoisuuteen on esitetty kuvassa 4.10. On kuitenkin huomattava, että kuvan perusteella ei ole mahdollista tehdä johtopäätöksiä kosteuspitoisuuden ja levyn lämmönjohtavuuden välisen korrelaatiokertoimen arvosta, sillä tyypiltään erilaisten levyjen lämmönjohtavuudet ovat erisuuruisia kuivanakin. Korrelaatiokerroin olisikin syytä määrittää mittaamalla lämmönjohtavuus samasta näytelevystä keinotekoisesti eri kosteuspitoisuuksiin saatetuista koekappaleista (vrt. kappale 3.3.3).



Kuva 4.10. +10 °C keskilämpötilassa mitatut lämmönjohtavuudet kappaleiden kosteuspitoisuuden suhteen.

Kaikki levynäytteet ovat HCFC-ponnekaasun aikakaudelta. Tästä johtuen niiden lämmönjohtavuus on alhaisempi kuin nykyisellä CO₂-ponnekaasulla paisutetuissa levyissä. Kuitenkin HCFC-kaasulla paisutetusta levystä mitattu lämmönjohtavuus ylittää yhdessä tapauksessa (λ_{10} , E198+670) jo nyt, kahdeksan käyttövuoden jälkeen, mitoitusarvon 0,037 W/Km, vaikka kappaleen kosteuspitoisuus on ainoastaan 2,8 tilavuusprosenttia. Toisaalta kolmen muun kuivemmasta ryhmästä mitatun levyn lämmönjohtavuus oli säilynyt melko selvästi alhaisempana. Näidenkin kohdalla mitoitusarvo kuitenkin mitä ilmeisimmin ylittyy vaaditun käyttöiän aikana, mikäli

kosteuden imeytyminen jatkuu oletetun suuruisena. Vakavampi mitoitussarvon ylitys tapahtuu nykyisillä CO₂-ponnekaasulla paisutetuilla levyillä (ks. kappale 5.6).

Eri lämpötiloissa mitatuista lämmönjohtavuuksista oli odotetusti nähtävissä, että suhteellisen kuivien, kosteuspitoisuudeltaan 0,9 ja 1,2 tilavuusprosentin kappaleiden lämmönjohtavuus oli hieman pienempi -5 °C kuin +10 °C keskilämpötilassa mitattuna. Kosteampien kappaleiden osalta tilanne oli päinvastainen johtuen jään vettä suuremmasta lämmönjohtavuudesta. Kosteimman kappaleen kohdalla ero oli huomattava, sillä siitä -5 °C keskilämpötilassa mitattu lämmönjohtavuus oli noin 20 % suurempi kuin +10 °C keskilämpötilassa mitattu.

5 LABORATORIOKOKKEET KÄYTTÄMÄTTÖMILLE XPS-LEVYILLE

5.1 Yleistä

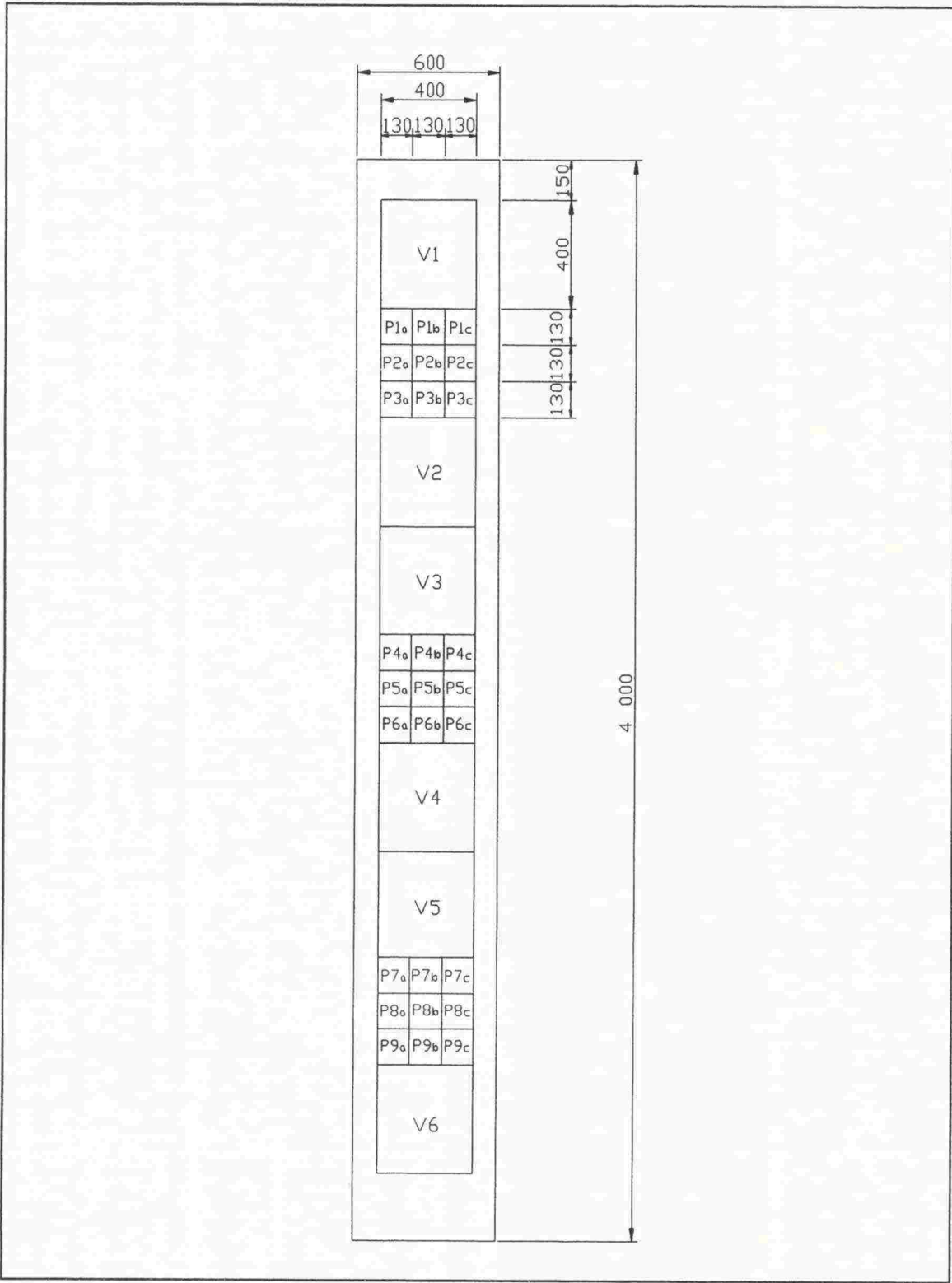
Käyttämättömistä XPS-levyistä tutkittiin laboratoriossa niiden käyttäytymistä sekä syklisen että staattisen rasituksen alaisena, lämmönjohto-ominaisuuksia sekä tiheyttä. Tutkimuksia tehtiin kaikkien kolmen materiaalivalmistajan levyille. Syklisissä rasituskokeissa selviteltiin kuormituksen suuruutta varioimalla levyn vaurioitumisen riippuvuutta kuormitustasosta. Tarkoituksena oli tällä tavoin saada käsitys mahdollisen akseli-painon korottamisen vaikutuksista routalevyjen vaurioitumiseen. Staattisissa kuormituskokeissa tarkkailtiin levyn lujuusominaisuuksien muutoksia levyn pituus- ja poikkisuunnassa sekä levyn valmistuksesta kuluneen ajan suhteen. Koetuloksista etsittiin yhteyttä levyn käyttäytymiselle staattisessa puristuskokeessa sekä syklisessä väsymiskokeessa. Tarkasteltiin myös eri valmistajien levyillä saatujen tulosten eroja. Lämmönjohtavuusmittauksia tehtiin tarjoamaan vertailupohjaa ratanäytteille tehdyille mittauksille. Selvitysten perusteella tehtiin tekniset toimitusehdot ratarakenteessa käytettäville XPS-routalevyille (liite 1).

5.2 Tutkimuksissa käytetyt levyt

Tutkimuksissa käytettiin kunkin kolmen rautateille XPS-eristeitä toimittaneen materiaalivalmistajan levyjä. Finnfoam Oy:n levyjä tutkittiin kahdesta eri valmistuserästä. Levyjen tiedot on esitetty tarkemmin taulukossa 5.1. Taulukosta nähdään myös kullekin levytyypille tehtyjen kokeiden määrä. Toimitetut levyt olivat kokonaisia eli 4,0 m pitkiä ja 0,60 m leveitä ratarakenteen routaeristeinä käytettäväksi tarkoitettuja levyjä, joiden pitkällä sivuilla oli 6 cm ponttaus. Näytekappaleiden sahauksen ja numeroinnin periaate on esitetty kuvassa 5.1.

Taulukko 5.1. Tutkimuksissa käytetyt levyt ja kullekin levytyypille tehtyjen kokeiden lukumäärä.

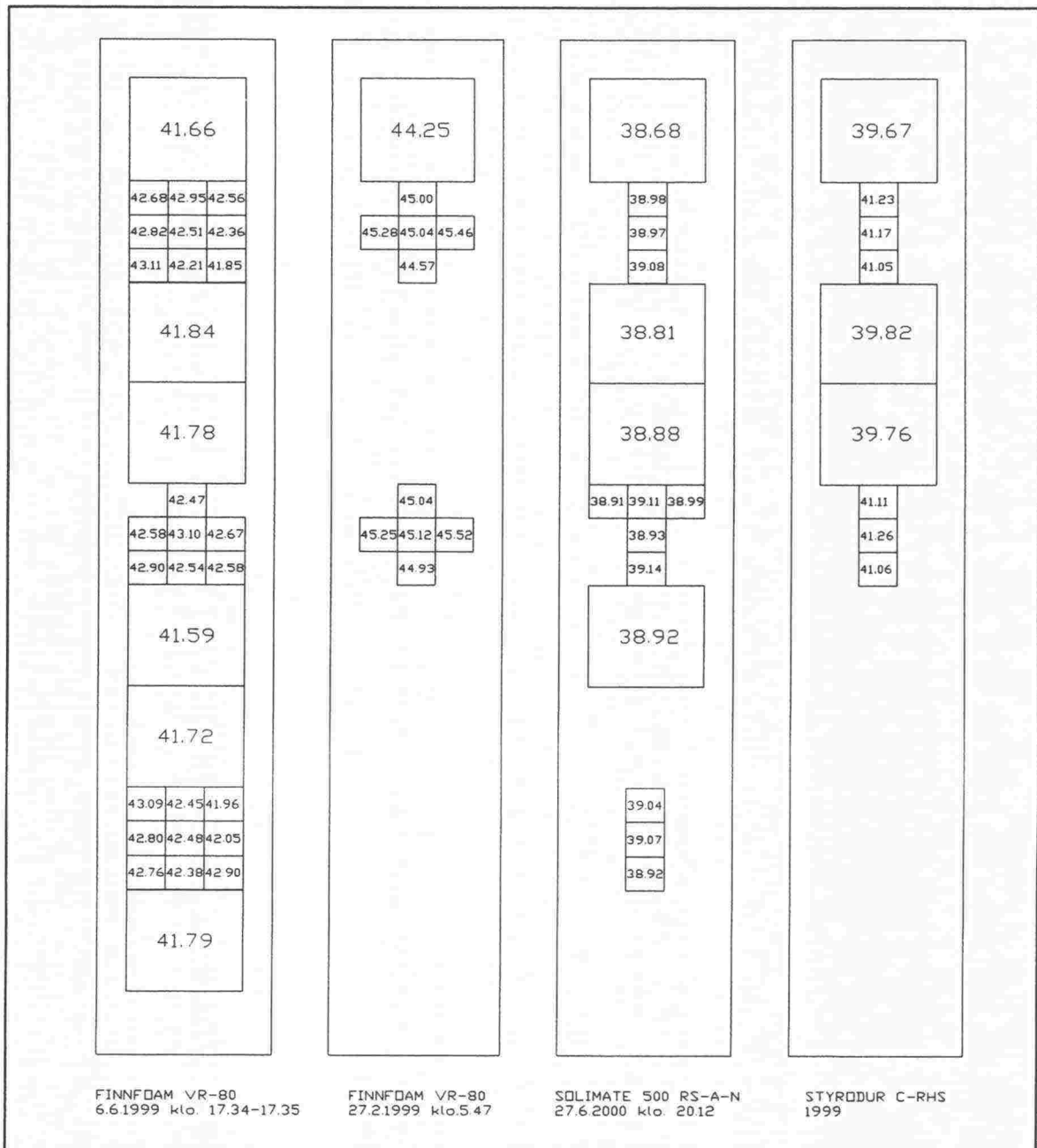
Valmistaja	Finnfoam	Finnfoam	Dow	Basf
Levyn tyyppi	VR-80	VR-80	Solimate 500 RS-A-N	Styrodur C-RHS
Nimellispaksuus	80 mm	80 mm	100 mm	80 mm
Valmistusaika	6.6.1999 klo 17.34	27.2.1999 klo 5.47	27.6.2000 klo 20.12	1999
Vastaanottopäivä	10.5.2000	26.6.2000	28.7.2000	25.8.2000
Toimitustapa	Valmistajan lähetys tehtaalta	Lähetys VR:n varastosta	Valmistajan lähetys tehtaalta	Lähetys VR:n varastosta
Puristuskokeita	17	10	11	6
Väsymiskokeita	6	1	5	3
Tiheyksmittauksia	32	11	15	9
Lämmönjohtavuusmittauksia	3	-	-	1



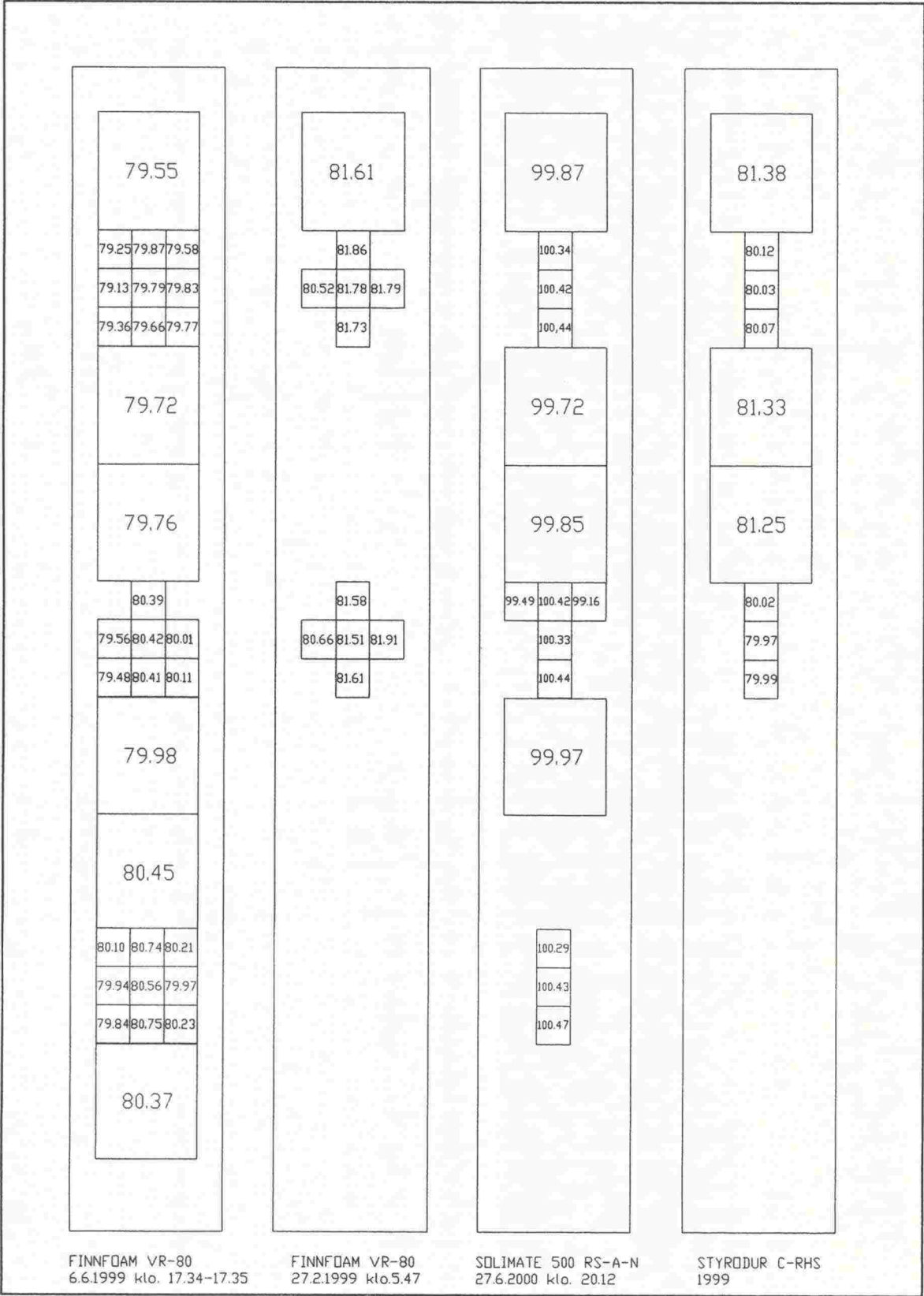
Kuva 5.1. Näytelevyjen sahaus 400 x 400 mm väsymiskoekappaleiksi ja 130 x 130 mm puristuskoekappaleiksi sekä näytteiden numerointiperiaate.

5.3 Tiheys ja paksuus

Kunkin puristus- ja väsymiskoe-kappaleen tiheys määritettiin ennen koetta. Puristuskoe-kappaleen tilavuuden laskennassa käytettiin kunkin sivun ylä- ja alareunasta sekä keskeltä mitattujen sivupituuksien keskiarvoa ja sivujen keskeltä mitattujen paksuuksien keskiarvoa. Mittaukset tehtiin digitaalisella näytöllä varustetulla työntömitalla, jonka tarkkuus oli 0,01 mm. Väsymiskoe-kappaleiden tilavuus laskettiin vastaavasti sivujen ylä- ja alareunoista mitattujen sivupituuksien sekä kultakin sivulta kolmesta kohdasta mitattujen paksuuksien keskiarvoista. Näytelevyjen eri kohdista määritetyt tiheydet ja keskimääräiset paksuudet on esitetty kuvissa 5.2-5.3.



Kuva 5.2. Näytelevyistä sahatuista koekappaleista määritetyt tiheydet (kg/m^3). Kuvassa nähdään myös levyjen valmistusajankohta.



Kuva 5.3. Näytelevyistä sahatuista koekappaleista määritetyt paksuudet (mm). Kuvassa nähdään myös levyjen valmistusajankohta.

Näytekappaleiden paksuusmittausten perusteella havaittiin, että levyn paksuus vaihteli levyn poikkileikkauksessa siten, että pääsääntöisesti levyt olivat keskiosistaan paksumpia kuin reunoilta. Tämän seurauksena myös koekappaleista mitatut tiheydet vaihtelivat hieman levyn poikkileikkauksen suunnassa. Levyjen pituussuunnassa paksuus- samoin kuin tiheysvaihtelutkin olivat vähäisiä.

Mittaustulosten keskiarvot on laskettu taulukkoon 5.2. Taulukosta voidaan todeta levyjen täyttäneen RHK:n levyjen tiheydelle ja paksuudelle asettamat vaatimukset lukuun ottamatta Solimate-levyä, jonka tiheys jäi hieman alle vaaditun 40 kg/m^3 .

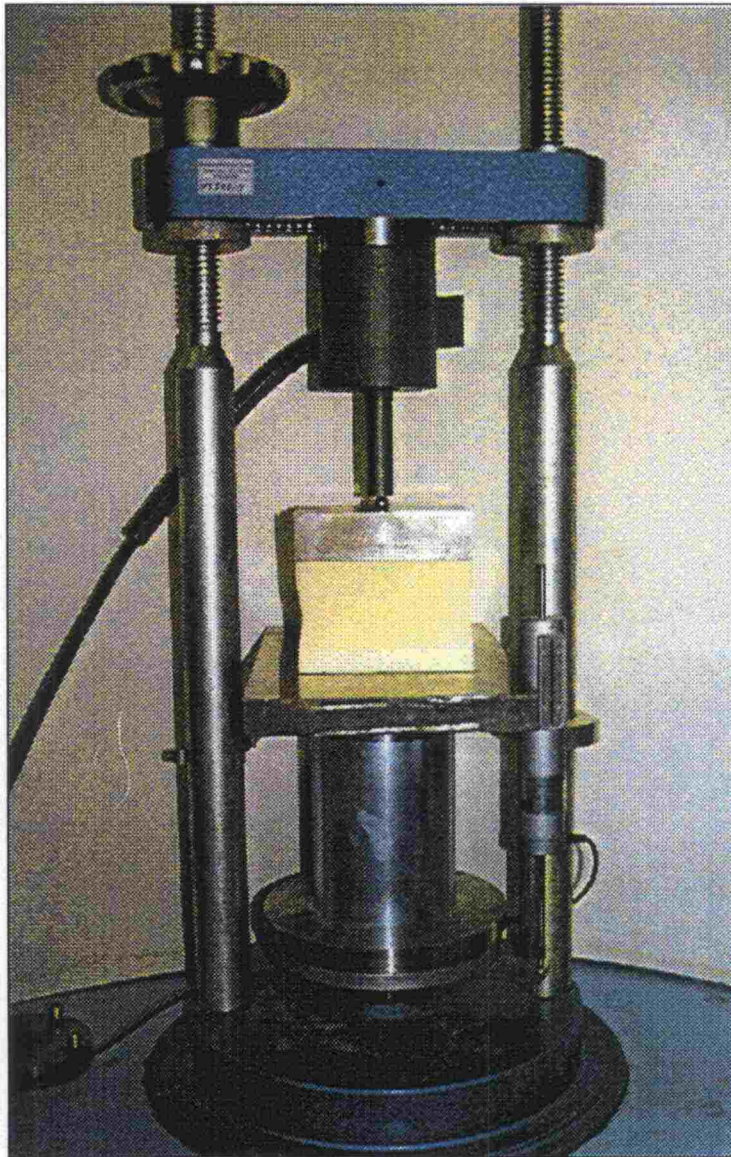
Taulukko 5.2. Näytekappaleista eri levytyypeille määritetyt keskimääräiset paksuudet ja tiheydet.

Levytyyppi	Keskimääräinen	
	Paksuus (mm)	Tiheys (kg/m^3)
FINNFOAM VR-80, Valmistettu 6.6.1999 klo 17.34-17.35	79.96	42.42
FINNFOAM VR-80, Valmistettu 27.2.1999 klo 5.47	81.51	45.04
SOLIMATE 500 RS-A-N, Valmistettu 27.6.2000 klo 20.12	100.11	38.96
STYRODUR C-RHS, Valmistettu 1999	80.42	40.68

5.4 Staattinen puristuskoe

5.4.1 Puristuskomenetelmä

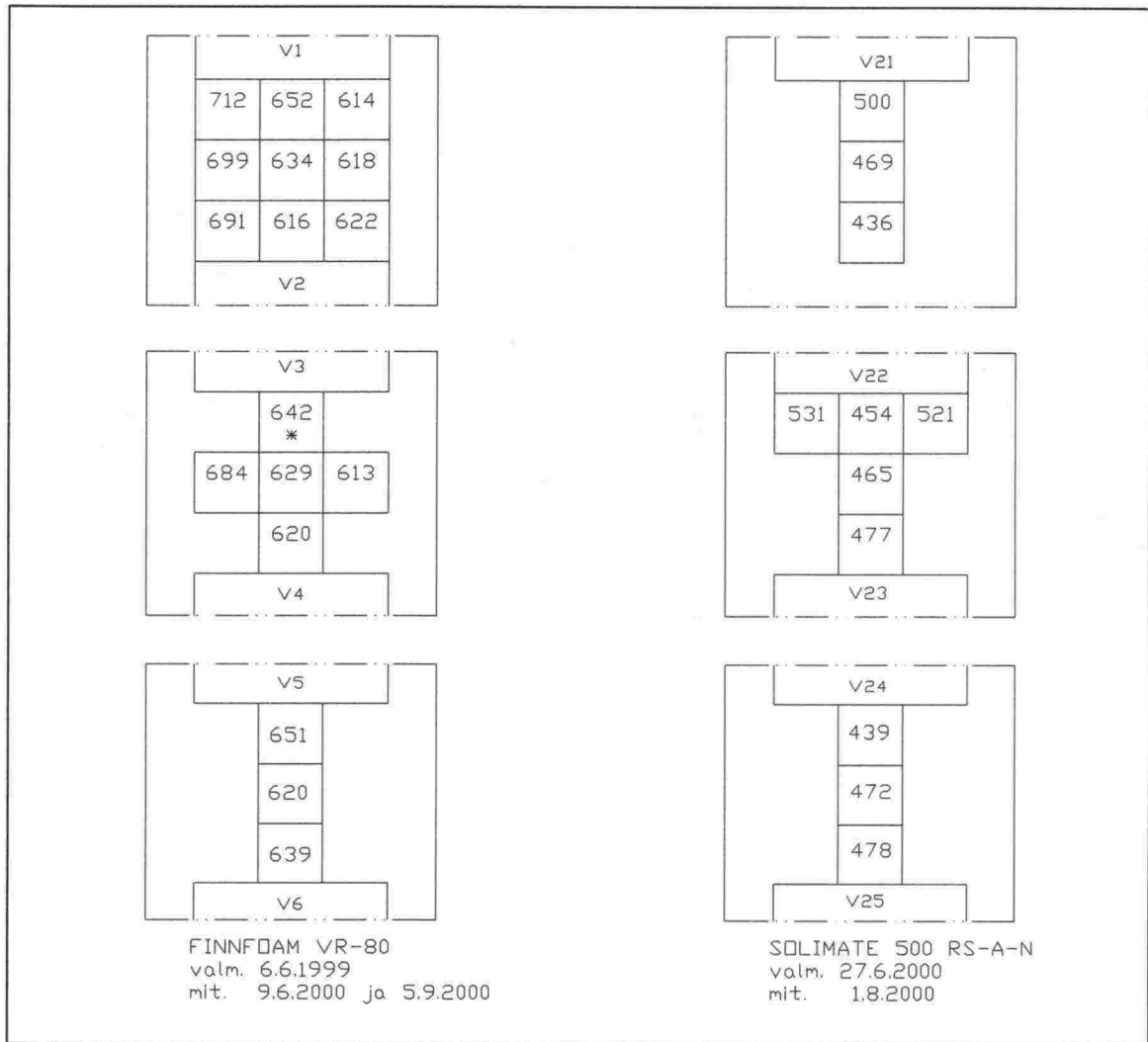
Staattisessa puristuskokeessa käytettiin kuvan 5.4 mukaista laitteistoa. Kooltaan $130 \times 130 \text{ mm}$ näytelevy asetettiin teräslevyjen väliin ja välykset poistettiin. Näytettä puristettiin tietokoneohjatusti tasaisella noin 2.0 mm/min nopeudella kasaan, kunnes saavutettiin vähintään 10 % kokoonpuristuma. Em. lisäksi koemenettely oli normin EN 826 [44] mukainen. Normin mukaan levyn käyttäytymistä puristavan kuormituksen alaisena kuvataan puristus- eli murtolujuudella tai selvän murtokohdan puuttuessa 10 % kokoonpuristumaa vastaavalla puristusjännityksellä.



Kuva 5.4. Staattinen puristuskoelaitteisto.

5.4.2 Puristuskokeiden tulokset

Levyjen eri kohdista saatuista näytekappaleista määritetyt puristuslujuudet on esitetty kuvissa 5.5-5.6. Määritettyjen puristuslujuuksien keskiarvo (ks. taulukko 5.3) täytti RHK:n 450 kPa:n vaatimuksen kaikkien levytyyppien osalta, Solimate-levy tosin melko niukasti joidenkin yksittäisten mittaustulosten alittaessa em. vaatimuksen. Finnfoam-levyjen puristuslujuus oli huomattavan suuri. Kuvista ja taulukosta 5.3 nähdään Finnfoam- ja Solimate-levyjen puristuslujuuden melko huomattava vaihtelu levyn poikittaissuunnassa. Puristuslujuus levyn laidoilla oli suurempi kuin levyn keskellä (Solimate, Finnfoam 27.2.1999) tai sitten puristuslujuus toisessa laidassa oli suurempi ja toisessa laidassa pienempi kuin levyn keskellä (Finnfoam 6.6.1999). Levyn keskeltä otettujen näytteiden puristuslujuudet olivat lähellä koko levyn keskimääräistä arvoa ja olivat keskimäärin vain hieman sitä alhaisempia. Pituussuunnassa vaihtelu oli vähäisempää. Styrodur-levyssä puristuslujuuden vaihtelu oli hyvin vähäistä.

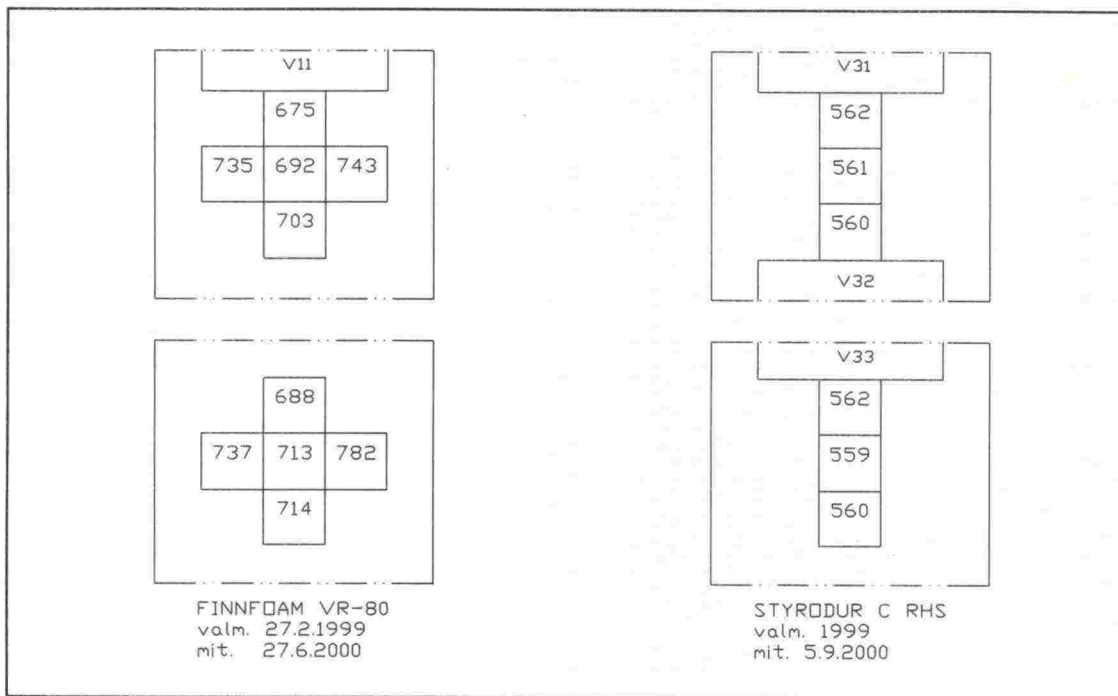


Kuva 5.5. Finnfoam- (valmistettu 6.6.1999) ja Solimate-levyjen eri kohdista mitatut puristuslujuudet (kPa). Kuvaan on merkitty myös mittauspäivä.

*) 10 % kokoonpuristumaa vastaava puristusjännitys

Taulukko 5.3. Keskimääräiset murtoa vastaavat kokoonpuristumat ja puristuslujuudet laskettuna kaikista mittauksista sekä levyn vasemmasta laidasta, keskeltä ja oikeasta laidasta mitatuista puristuslujuuksista. Puristuskokeiden suorituspäivät on nähtävissä kuvista

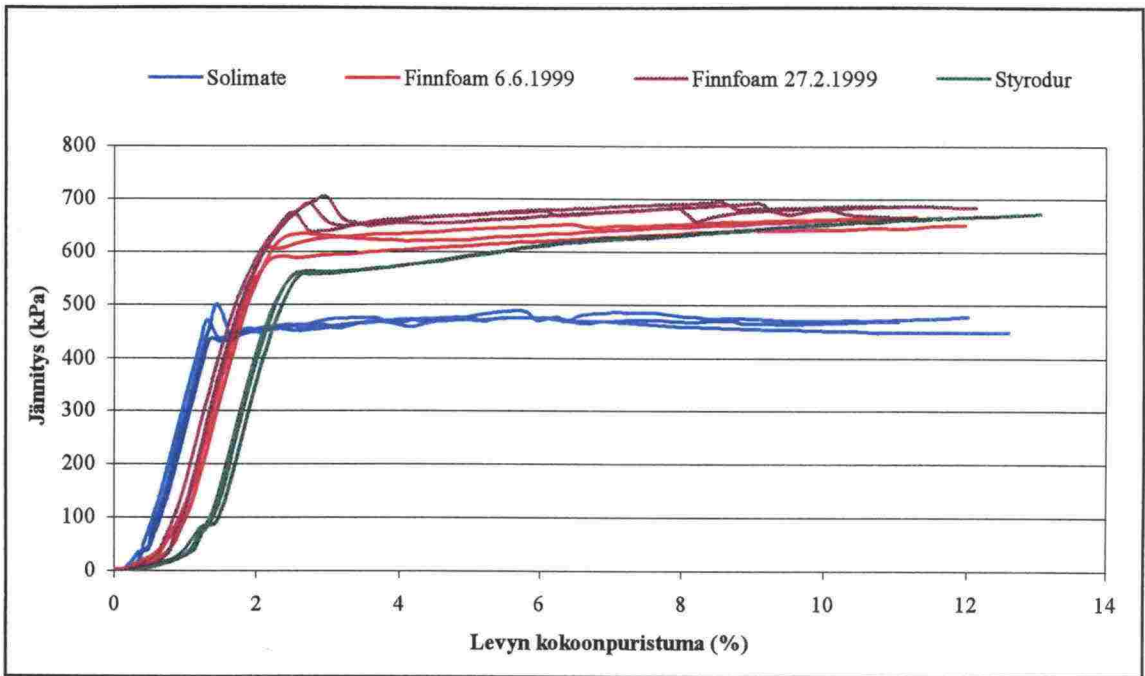
Levytyyppi	Keskimääräinen murtoa vastaava kok.purist. [%]	Keskimääräinen puristuslujuus [kPa]	Keskimäärin levyn laidoissa ja keskellä [kPa]		
			vasen	keski	oikea
FINNFOAM VR-80, Valmistettu 6.6.1999 klo 17.34-17.35	2,7	644	697	634	617
FINNFOAM VR-80, Valmistettu 27.2.1999 klo 5.47	3,5	718	736	698	763
SOLIMATE 500 RS-A-N, Valmistettu 27.6.2000 klo 20.12	1,5	477	531	465	521
STYRODUR C-RHS, Valmistettu 1999	2,7	561		561	



Kuva 5.6. Styrodur- ja 27.2.1999 valmistetun Finnfoam-levyjen eri kohdista mitatut puristuslujuudet (kPa). Kuvaan on merkitty myös mittauspäivä.

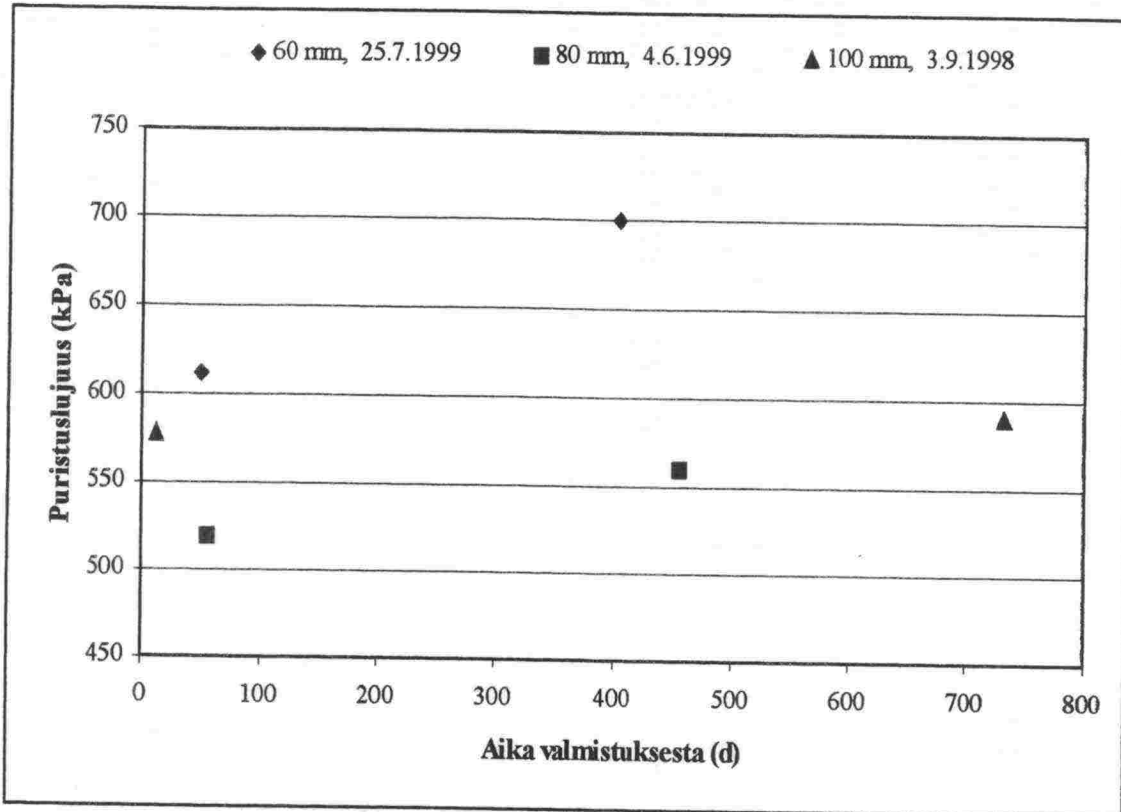
Eri levytyypeille ominaiset puristuskokeiden jännitys–kokoonpuristumakäyrät on esitetty kuvassa 5.7. Käyristä nähdään, kuinka murtokohta oli selvästi havaittavissa Finnfoam- ja Solimate-levyissä. Kaikissa Solimate-levyn koekappaleissa murto tapahtui alle 2 %:n kokoonpuristumalla. Finnfoam-levyllä murto tapahtui 90 %:ssa tutkituista koekappaleista 2,2 - 3,3 %:n kokoonpuristumavälillä. Yhden koekappaleen kohdalla varsinaista murtoa ei tapahtunut ja yhden kohdalla murto tapahtui 6,5 %:n kokoonpuristumalla. Murtokohdan havaitseminen oli hankalampaa Styrodur-levyissä, sillä murtumisen yhteydessä käyrissä tapahtuva notkahdus eli jännityksen pieneneminen oli hyvin pieni tai sitä ei ollut lainkaan. Murron tai myötörajan ylittymisen jälkeen kokoonpuristuma kasvoi voimakkaasti jännityksenkin kuitenkin kasvaessa. Tällaisessa tulkinnanvaraisessa tilanteessa normin EN 826 määräyksestä, jonka mukaan murtokohdan puuttuessa määritetään puristuslujuuden sijasta 10 %:n kokoonpuristumaa vastaava puristusjännitys, seuraa oletettua murtokohdan puristusjännitystä noin 20 % suuremman arvon huomioiminen. Edellä esitetyn nojalla voisi murtokohdan puuttuessa levytyyppien vertailtavuuden nimissä olla perustellumpaa käyttää puristuslujuutta vastaavana puristusjännityksenä pienemmällä kuin 10 %:n kokoonpuristumalla saavutettavaa arvoa.

Levytyyppien erilainen käyttäytyminen puristuskokeessa oli nähtävissä kokeen aikana myös näytekökappaleista. Finnfoam- ja Solimate-levyjen heikoimpaan kohtaan, keskelle, muodostui murtorajan ylittymisen myötä selvästi kokoonpuristunut vauriovyöhyke. Levyn kokoonpuristuman lisääntyminen tapahtui tämän vauriokohdan laajenemisena sekä ylös että alaspäin. Styrodur-levyissä vaurioituminen alkoi levyn alapinnasta. Vaurioitunut alue laajeni kokeen edetessä ylöspäin. Styrodur-levyn vaurioitunut osa muuttui ”rapeaksi”, osittain pois raaputettavissa olevaksi ”puruksi”.



Kuva 5.7. Eri levytyypeille ominaiset jännitys-kokoonpuristumakäyrät puristuskokeessa.

Aiempiin laadunvalvontakokeissa tehtyihin mittauksiin verrattuna nyt tutkittujen Finnfoam-levyjen puristuslujuus oli huomattavan suuri. Tämän vuoksi selviteltiin ajan vaikutusta levyn puristuslujuuteen määrittämällä puristuslujuus aiemmin laadunvalvontakokeissa käytettyjen levyjen ylijäämäkappaleista ja vertaamalla eri aikoina määritettyjä arvoja keskenään. Tulokset on esitetty kuvassa 5.8. Kuvasta nähdään, että kolmesta tutkitusta tuotantoerästä kahdessa, vuonna 1999 valmistetuissa puristuslujuus on kasvanut selvästi. Paksuudeltaan 60 mm levyn puristuslujuus on kasvanut suhteessa enemmän kuin 80 mm levyn. Sen sijaan 3.9.1998 valmistetussa 100 mm levyssä puristuslujuuden kasvu on huomattavasti vähäisempää. Yhtenä syynä ilmiöön on oletettavasti ponneaineen muuttuminen vuonna 1999 hiilidioksidiksi, joka poistuu solukosta aikaisemmin käytettyjä HCFC-kaasuja nopeammin ja sitä nopeammin mitä ohuemmasta levystä on kyse lisäten samalla levyn puristuslujuutta. Puristuslujuuden ajan myötä tapahtuva lisääntyminen, levyn ”kypsyminen”, on ominaista muillekin kuin Finnfoam-levyille. Puristuslujuus kasvaa voimakkaimmin heti levyn valmistuksen jälkeisinä päivinä. Laadunvalvontakokeiden perusteella voidaan myös todeta Finnfoam-levyjen puristuslujuuden vaihdelleen tuotantoerästä riippuen huomattavasti.



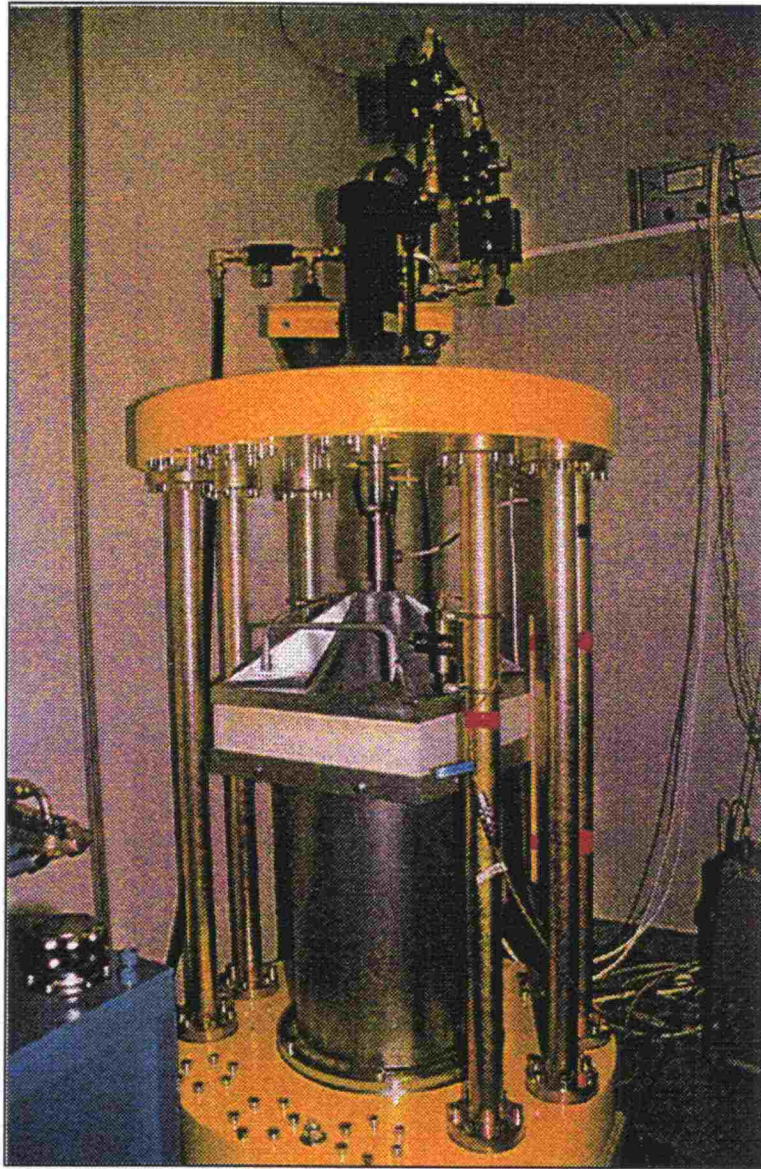
Kuva 5.8. Finnfoam-levyn puristuslujuuden kasvu ajan suhteen. Kuvan pisteet edustavat kolmesta peräkkäisestä näytekappaleesta määritettyjen puristuslujuuksien keskiarvoa. Selite-osassa on kerrottu levyn paksuus ja valmistuspäivä.

Edellä kuvattu levyn kypsymisilmiö selittää osaltaan puristuslujuuksien suurehkot erot levytyyppien välillä. Heikoimman puristuslujuuden omaava Solimate-levy oli testattaessa varsin tuore, vain noin kuukauden ikäinen, kun taas Finnfoam-levyt olivat yli vuoden vanhoja. On myös huomattava, että Solimate-levy oli muita testattuja levyjä paksumpi.

5.5 Väsymiskäyttäytyminen

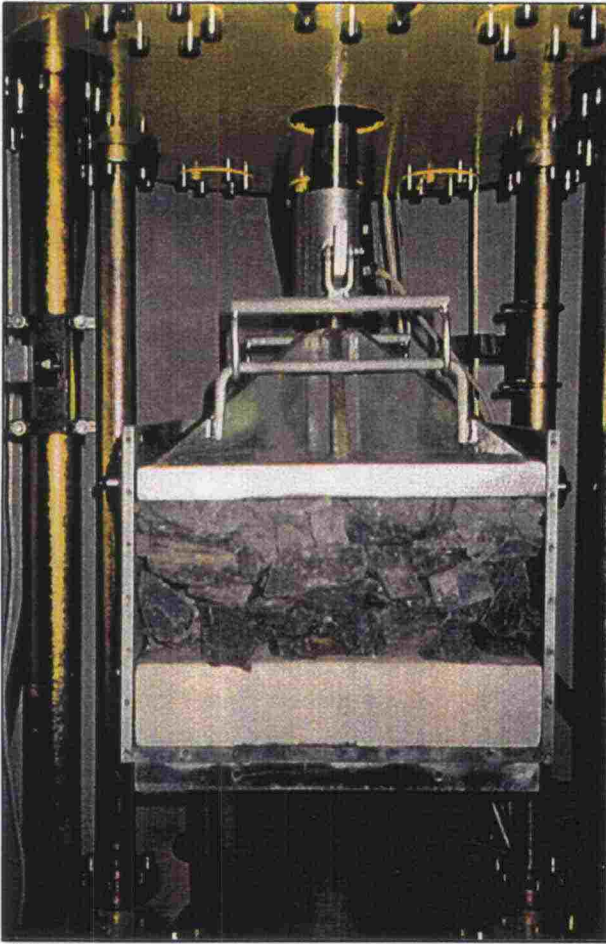
5.5.1 Väsymiskoejärjestelyt

XPS-levyjen väsymiskäyttäytymistä tutkittiin syklisessä rasituskokeessa, jossa käyttämättömiin koekappaleisiin kohdistettiin sileiden teräslevyjen välityksellä 2.000.000 kuormituspulssia 4 Hz taajuudella (ks. kappale 3.4.3). Väsymiskoelaitteisto (ks. kuva 5.9) ja koejärjestelyt on kuvattu tarkemmin TTKK:n menetelmäohjeessa [47]. Väsymiskokeita tehtiin kullekin levytyypille usealla eri kuormitustasolla. Kuormituksen staattinen osuus oli kussakin koesarjassa 10 kPa. Myös syklinen kuormitus oli kussakin koesarjassa vakio vaihdellen koesarjasta riippuen 190 ja 340 kPa:n välillä. Täten kokonaiskuormitus yksittäisen pulssin huipulla vaihteli koesarjasta riippuen 200 ja 350 kPa:n välillä. Kokeissa tarkkailtiin levyyn muodostuvan pysyvän kokoonpuristuman kehitystä kuormituspulssimäärän ja kumulatiivisen kuormituksen suhteen sekä syntyneen kokoonpuristuman riippuvuutta kuormitustasosta tarkoituksena arvioida näin mahdollisen akselipainojen korottamisen vaikutusta routalevyjen vaurioitumiseen.

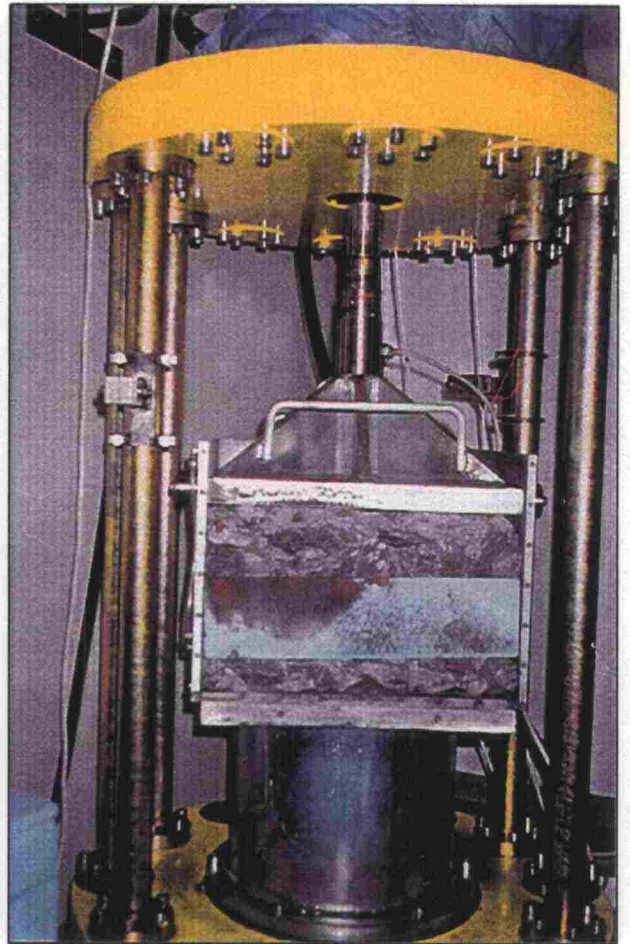


Kuva 5.9. Väsymiskoejärjestely.

Edellä kuvatuilla järjestelyillä 12 näytettä kuormitettiin sileiden teräslevyjen välissä. Näiden lisäksi tehtiin 3 muutoin vastaavaa koesarjaa, mutta kuormitus levyyn kohdistettiin noin 15 cm raidesepelikerroksen välityksellä (ks. kuva 5.10). Yksi koesarja tehtiin vielä siten, että sekä koekappaleen ylä- että alapuolelle asennettiin sepelikerros (ks. kuva 5.11). Syklinen kuormituskoe tehtiin yhteensä 16 koekappaleelle. Tehtyjen syklisten väsymiskokeiden yhteenvetolomakkeet on esitetty tämän raportin liitteenä 3.



Kuva 5.10. Väsymiskoejärjestely, jossa kuormitus koekappaleeseen kohdistettiin sepelikerroksen välityksellä.



Kuva 5.11. Väsymiskoejärjestely, jossa kuormitus koekappaleeseen kohdistettiin sepelikerroksen välityksellä ja lisäksi koekappale oli sijoitettu sepelikerroksen päälle

5.5.2 Väsymiskokeet

Yhteenvedo väsymiskokeista on esitetty taulukossa 5.4. Taulukkoon on merkitty näyte-kappaleisiin kokeen (2 miljoonan kuormituspulssin) aikana muodostunut kokoonpuristuma. Kokoonpuristuma on mitattu staattisen kuormitusosuuden (10 kPa) alaisena. Kaikki testatut levyt täyttivät selvästi RHK:n vaatimuksen syklisen rasituksen kestosta eli väsymiskokeessa muodostui alle 5 % pysyvä kokoonpuristuma 200 kPa:n kuormitus-tasolla.

Levyt, joihin kuormitus raidesepelin välityksellä kohdistettiin, on esitetty kuvissa 5.12 ja 5.13. Levyihin muodostuneet kokoonpuristumat olivat hyvin vähäisiä. Sen sijaan levyihin muodostui sepelirakeiden tunkeutumisen aiheuttamia huomattavia painaumia, jotka vastasivat varsin hyvin radasta otettuihin näytteisiin muodostuneita painaumia. Finnfoam-levylle 200 kPa:n kuormitustasolla tehdyssä kokeessa syvin sepelirakeen tunkeutumisesta aiheutunut painauma oli 11 mm. 275 kPa:n kuormitustasolla syvin painauma oli vastaavasti 14 mm. Solimate-levyyn muodostui 275 kPa kuormitustasolla huomattavasti laajempia ja syvempiä painaumia, joista syvin oli 18 mm. Sepelikerroksen päälle asetettuun, muutoin edellistä vastaavin koejärjestelyin rasitettuun

Solimate-levyyn, muodostui huomattavia painaumia myös levyn alapintaan syvimmän ollessa 28 mm. Lisäksi epätasaisesta alustasta johtuen levyyn muodostui epämääräisen suuntaisia ja muotoisia halkeamia.

Taulukko 5.4. Väsymiskokeet ja koekappaleisiin muodostunut kokoonpuristuma mitattuna 10 kPa:n kuormituksen alaisena. Koekappale V 00 on ollut rataa asennettuna, se on peräisin Toijala – Viiala rataosuuden rumpututkimuskohteesta km 152+695. Kuormitustaso kuvaa pulssin kokonaiskuormitusta sisältäen staattisen (10 kPa) ja syklisen osan. Kuormitustapa kuvaa, välitettiinkö kuormitus levyyn sepelistä vai sileästä teräslevystä (sileä/sepeli). Sepelin välityksellä kuormitettujen kappaleiden osalta kuormitustaso kuvaa sepelikerroksen yläpintaan kohdistettua kuormitusta ja kokoonpuristumaa ei ole koemenetelmästä johtuen mitattu. Koekappaleen V 25 koejärjestelyt olivat sellaiset, että myös näytekappaleen alapuolella oli raidesepeleitä.

Levytyyppi	Tunnus	Kuormitustapa (sepeli / sileä)	Kuormitustaso [kPa]	Kokoon- puristuma [%]
FINNFOAM VR-80 Valm. 6.6.1999 klo 17.34-17.35	V 01		200	1.31
	V 02		275	2.14
	V 06		300	4.56
	V 03		350	7.26
	V 04	sepeli	200	
	V 05	sepeli	275	
FINNFOAM VR-80 Valm. 27.2.1999 klo 5.47	V 11		200	0.90
SOLIMATE 500 RS-A-N Valm. 27.6.2000 klo.20.12	V 21		200	1.76
	V 23		240	3.13
	V 22		275	8.17
	V 24	sepeli	275	
	V 25	2* sepeli	275	
STYRODUR C-RHS Valm. 1999	V 31		200	2.03
	V 32		275	2.87
	V 33		350	6.39
FINNFOAM VR-80 (radasta)	V 00		200	2.22



Kuva 5.12. Koekappaleet Finnfoam-levystä, joihin on sepelikerroksen välityksellä kohdistettu 2 miljoonaa kuormituspulssin syklinen rasitus 200 kPa (vasemmalla) ja 275 kPa (oikealla) kuormitustasolla.

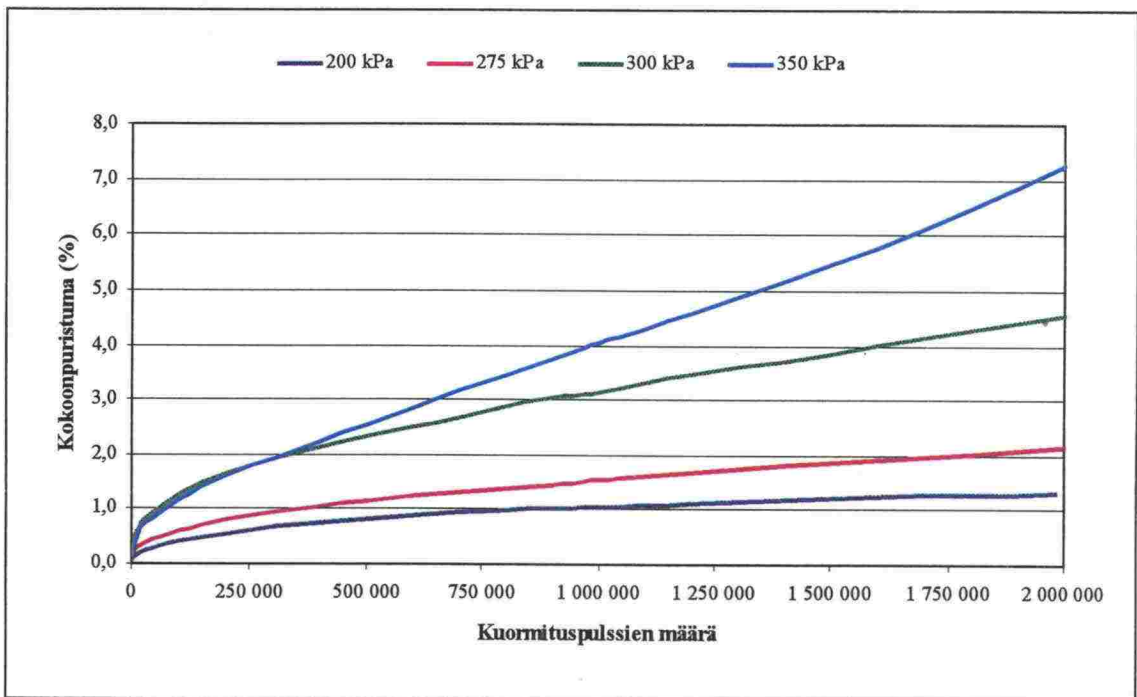


Kuva 5.13. Koekappaleet Solimate-levyistä, joihin on sepelikerroksen välityksellä kohdistettu 2 miljoonaa kuormituspulssin syklinen räsitus 275 kPa:n kuormitustasolla yläpinnastaan (yllä) ja alapinnastaan (alla) kuvattuna. Vasemmanpuoleinen levy oli asetettu sepelikerroksen päälle.

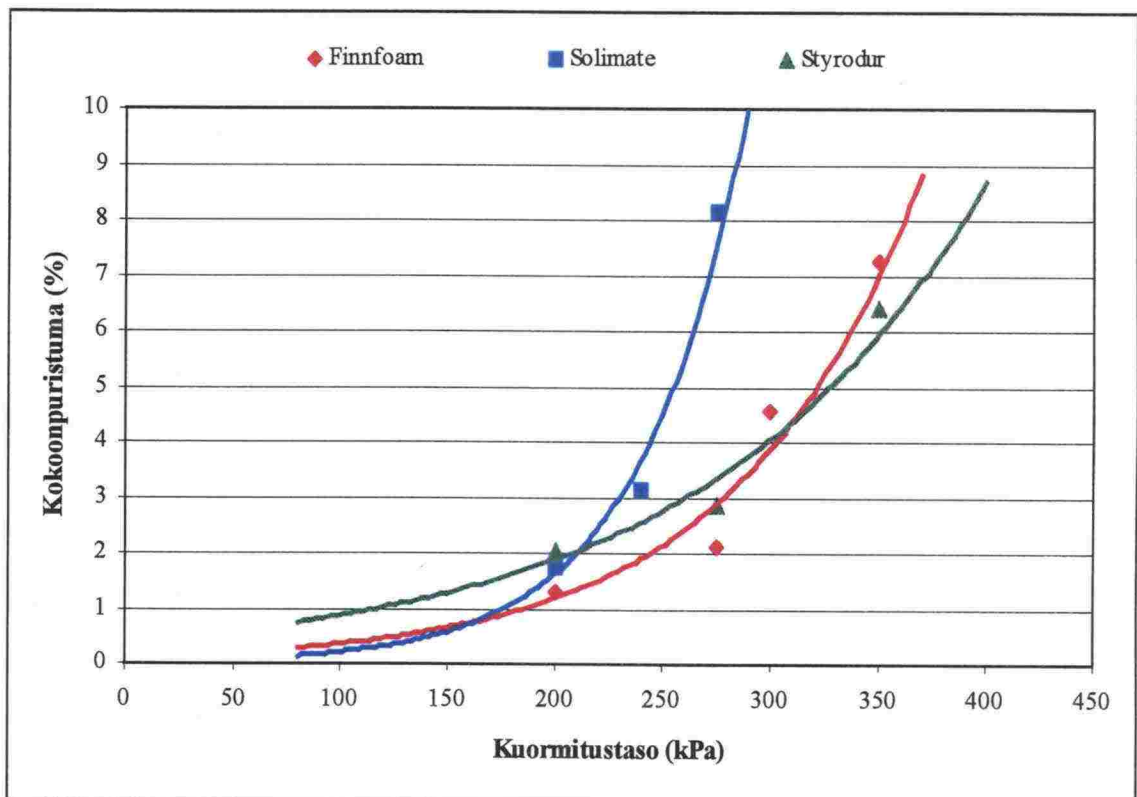
5.5.3 Kuormitustason vaikutus levyn kokoonpuristumaan

Kuormitustason vaikutusta väsymiskoeappaleen kokoonpuristumaan voidaan tarkastella kuvan 5.14 perusteella. Kuvassa on esitetty Finnfoam-levyn kokoonpuristuman kehitys kuormituspulssimäärän suhteen eri kuormitustasoilla tehdyissä väsymiskokeissa. Oletuksen mukaisesti kuormitustason korottaminen suurensi kokoonpuristumaa kuormituspulssimäärän pysyessä vakiona. Vastaava todettiin myös Solimate- ja Styrodur-levyillä.

Kuormitustason vaikutusta väsymiskokeessa syntyvään kokoonpuristumaan havainnollistaa kuva 5.15. Kuvaan on merkitty pisteinä tietyllä kuormitustasolla tehdyssä väsymiskokeessa muodostunut kokoonpuristuma kullekin levytyypille. Eksponentiaaliset trendiviivat korreloivat tulosten kanssa hyvin. Finnfoam- ja Solimate-levyjen käyttäytyminen oli hyvin samantyyppistä ottaen huomioon eron levyjen puristuslujuudessa. Kuormitustason kasvattaminen lisäsi vähiten Styrodur-levyn kokoonpuristumaa. Tuloksia tarkasteltaessa on huomattava, että suuremmalla kuormitustasolla myös levyyn kohdistettu kumulatiivinen kokonaiskuormitus on suurempi.

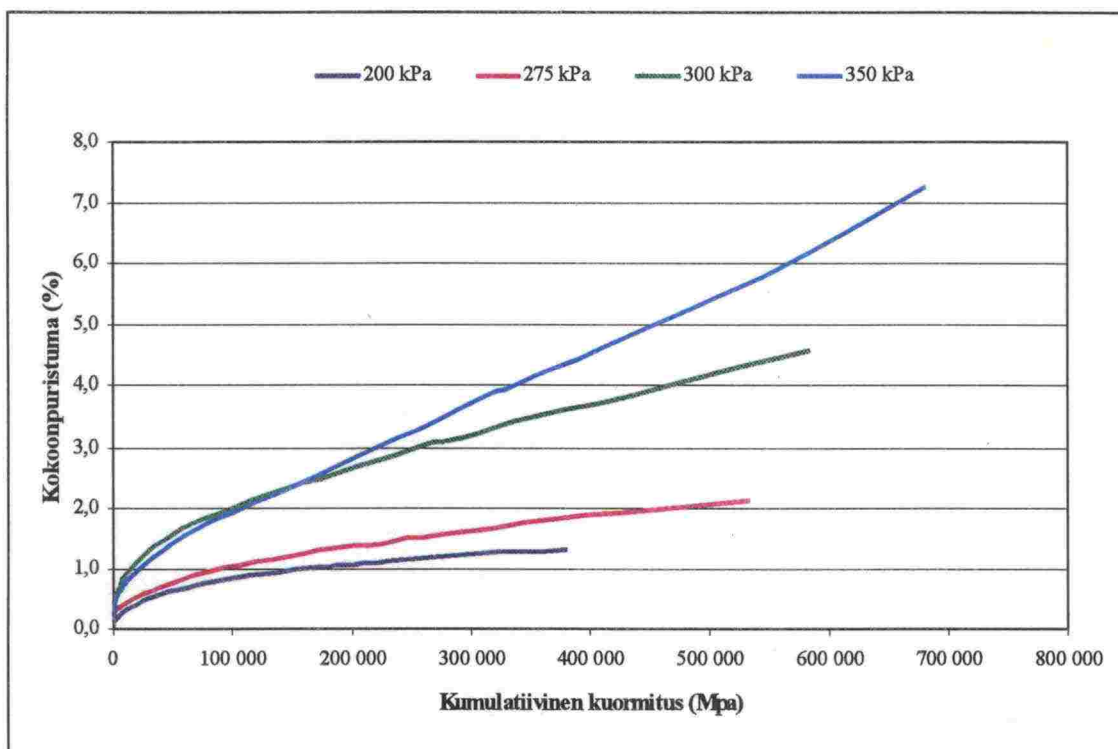


Kuva 5.14. Finnfoam-levyn kokoonpuristuma väsymiskokeessa kuormituspulssimäärän suhteen eri kuormitustasoilla.



Kuva 5.15. Väsymiskokeessa syntyvän kokoonpuristuman riippuvuus kuormitustasosta eri levytyypeillä. Kuvaan on piirretty myös eksponentiaaliset trendiviivat.

Kokoonpuristuman lisääntyminen oli luonnollista kuormitustasoa korotettaessa ja kuormituspulssimäärän säilyessä ennallaan. Koekappaleeseen kohdistettu kumulatiivinen kokonaiskuormitus tulee huomioida tarkasteltaessa varsinaista väsymisilmiötä. Kuvassa 5.16 on esitetty Finnfoam-levyn kokoonpuristuman kehitys eri kuormitustasoilla kuormituspulssimäärän sijasta levyyn kohdistetun kumulatiivisen kuormituksen suhteen. Kumulatiivinen kuormitus saadaan laskemalla yhteen kunkin kuormituspulssin sykliset osuudet. Kuvasta nähdään, kuinka kuormitustason nostaminen kasvattaa levyn kokoonpuristumaa silloinkin, kun levyyn kohdistettu kumulatiivinen kuormitus säilyy samana (eli kuormituspulssien määrää vähennetään). Myös käyrien suuntauksista nähdään kokeen loppuvaiheissa, että kokoonpuristuma lisääntyy nopeammin suuremmilla kuormitustasoilla. Vastaava väsymisilmiö todettiin myös muilla levytyypeillä.

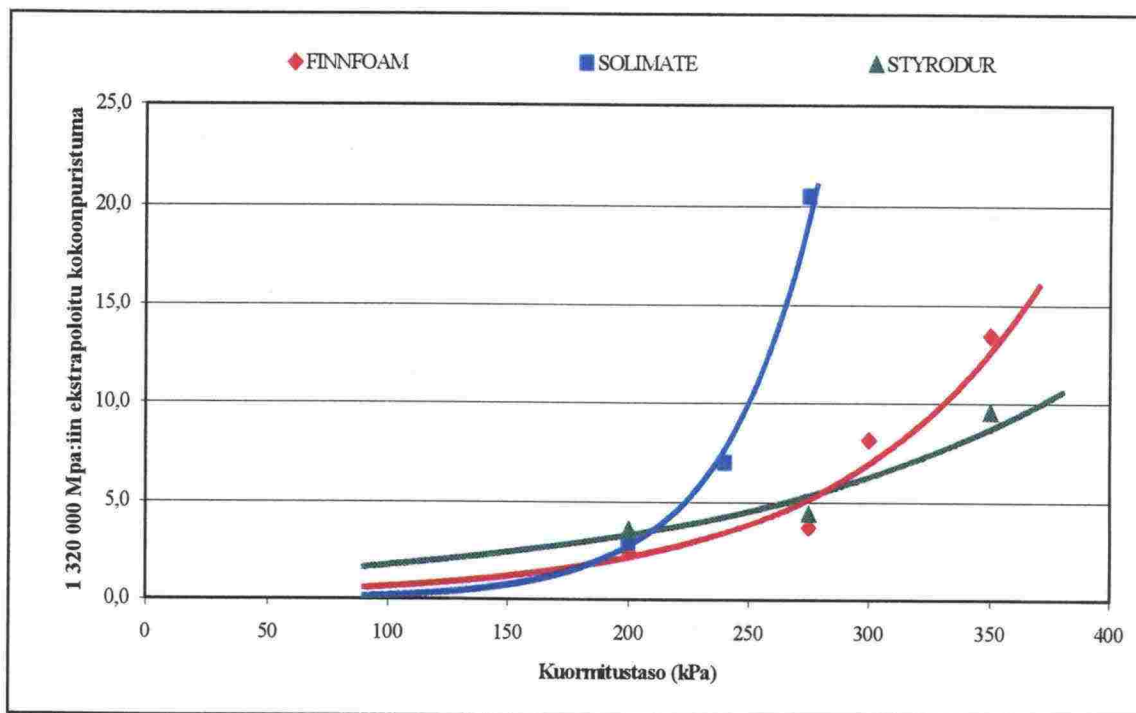


Kuva 5.16. Finnfoam-levyn kokoonpuristuma väsymiskokeessa levyyn kohdistetun kumulatiivisen kuormituksen suhteen eri kuormitustasoilla.

Kun pohditaan kuormitustason merkitystä eristelevyn kokoonpuristumaan, tarkastelu tulee kohdentaa tietylle aikavälille ja siten tietylle kumulatiiviselle kuormitukselle. Näin on syytä toimia, koska kuvan 5.16 mukaisesti eri kuormitustasoilla muodostuvien kokoonpuristumien keskinäiset suhteet riippuvat siitä, mille kumulatiiviselle kuormitukselle tarkastelu kohdistetaan. Tarkastelun alaiseksi kumulatiiviseksi kuormitukseksi on järkevää valita tukikerrokselle odotettavissa oleva ja siten myös routalevyiltä vaadittu kestoikä. Seuraavassa tarkastellaan 300 miljoonan bruttotonnin kuormitusajanjaksoa, mikä vastaa likimäärin oletusta R3-luokan raideseppelin kestoikästä [34].

Oletetaan kappaleen 3.4.1 perusteella, että routalevyyn kohdistuva kuormitus 250 kN:n akselikuormalla on 110 kPa. Tämän oletuksen perusteella 300 miljoonan bruttotonnin junakuormitus vastaa routalevyyn kohdistunutta 1.320.000 MPa kuormitusta. Ekstrapoloimalla kuvassa 5.16 esitetty kokoonpuristuman ja kumulatiivisen kuormituksen yhteys 1.320.000 MPa kuormitukseen mahdollistetaan eri kuormitustasoilla tarkasteluajan-

jaksona muodostuvien kokoonpuristumien vertailu. On syytä todeta, että nämä ns. vertailukokoonpuristumat eivät liene mahdollisia suurimmilla kuormitustasoilla. Niiden avulla on tarkoitus ainoastaan vertailla levyyn tietyillä kuormitustasoilla syntyviä vaurioita. Ekstrapoloinnin tuloksia olisi syytä varmentaa muutamalla täysimittaisella 1.320.000 MPa kuormitukseen jatketulla koesarjalla. Vertailukokoonpuristuman riippuvuus kuormitustasosta eri levytyypeillä on esitetty kuvassa 5.17.



Kuva 5.17. 1.320.000 MPa kumulatiiviseen kuormitukseen ekstrapoloitun kokoonpuristuman, ns. vertailukokoonpuristuman, riippuvuus kuormitustasosta eri levytyypeillä.

Oletetaan lisäksi ratarakenteen mallinnusmittausten ja mallinnuksen [26] perusteella, että akselikuorman korottaminen lisää routalevyyn kohdistuvaa kuormitustasoa samassa suhteessa. Tällöin kuvan 5.17 perusteella akselikuorman korottamisen voidaan arvioida lisäävän tutkittujen eristelevyjen vaurioitumista taulukossa 5.5 esitetyllä tavalla. On huomattava, että arviot vaurioitumisen lisäyksistä koskevat nimenomaan tutkittuja levyjä, eikä tuloksia voida tuotantovaihteluiden vuoksi yleistää koskemaan kaikkia kyseisten materiaalivalmistajien levyjä. Taulukkoon 5.4 on laskettu oletettu vaurioitumisen lisäys myös ottamalla huomioon esim. mahdollisesta puutteellisesta asennussyvyydestä ja dynaamisesta kuormituksesta aiheutuva levyyn kohdistuva kuormitustason kasvu varmuuskertoimella 1,5. Tämä on oleellista siksi, että suuremmalla kuormitustasolla vertailukokoonpuristuma kasvaa huomattavasti enemmän kuin alhaisemmalla kuormitustasolla, jos kuormitustasoa korotetaan kummassakin tapauksessa yhtä paljon. (vrt. kuva 5.17). Laskentamenetelmän suurin epävarmuus onkin levyyn kohdistuvan todellisen kuormitustason määrittäminen.

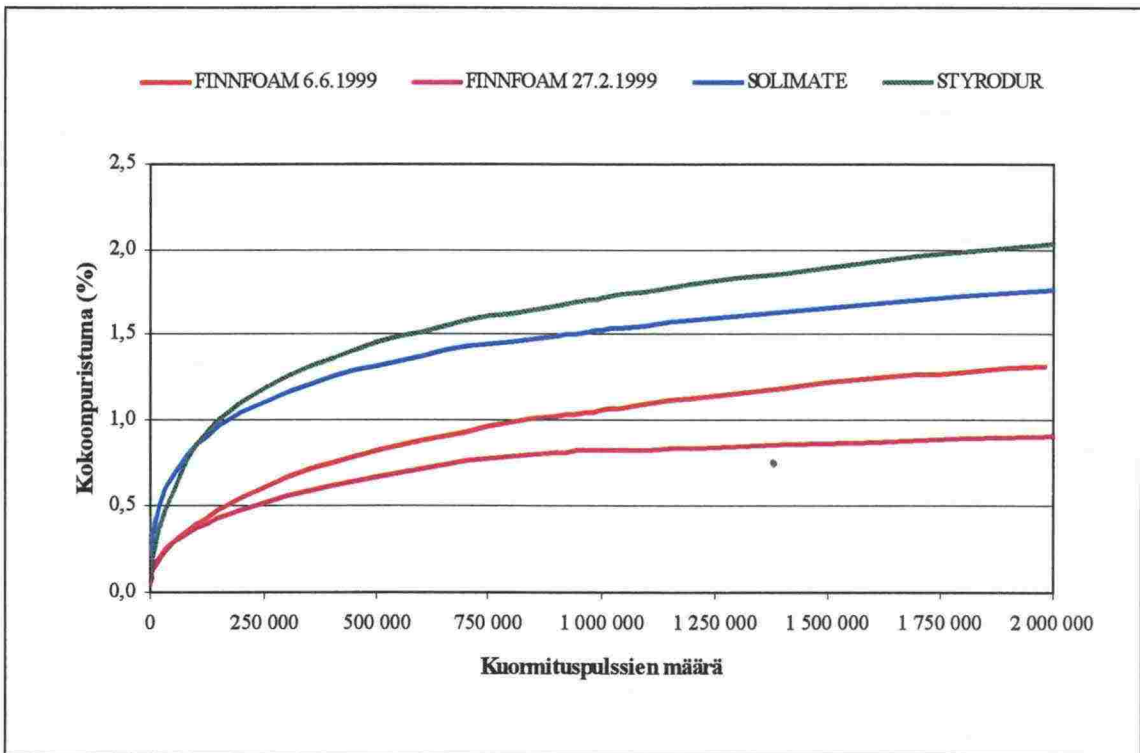
Taulukko 5.5. Akselikuorman korottamisesta 225 kN:sta 250 kN:iin ja 300 kN:iin aiheutuva routalevyjen vaurioitumisen lisääntyminen (%). Oikeanpuoleisissa sarakkeissa on levyyn kohdistuva kuormitustaso kerrottu varmuuskertoimella 1,5.

	Akselikuorman korotus			
	225 → 250 kN	225 → 300 kN	225 → 250 kN	225 → 300 kN
Varmuuskertoimen levyyn kohdistuvalle kuormitustasolle	1,0		1,5	
SOLIMATE	34 %	139 %	55 %	269 %
FINNFOAM	14 %	48 %	22 %	80 %
STYRODUR	8 %	24 %	12 %	39 %

Taulukon 5.5 nojalla akselikuorman korottaminen nykyisestä 225 kN:sta 250 kN:iin lisäisi rataa asennettujen, ominaisuuksiltaan tutkimuksissa käytettyjä levyjä vastaavien eristelevyjen vaurioitumista, kun kokonaiskuormituksen (bruttoliikennemäärän) oletetaan säilyvän samana. Vähiten korotus vaikuttaisi tutkituista levyistä Styroduriin, jonka vaurioituminen lisääntyisi 8-12 %. Solimate-levyssä vaurioitumisen lisääntyminen olisi melko huomattava, 34-55 %. Levyn puristuslujuuden yhteyttä vaurioitumislisäykseen on tarkasteltu kappaleessa 5.5.5.

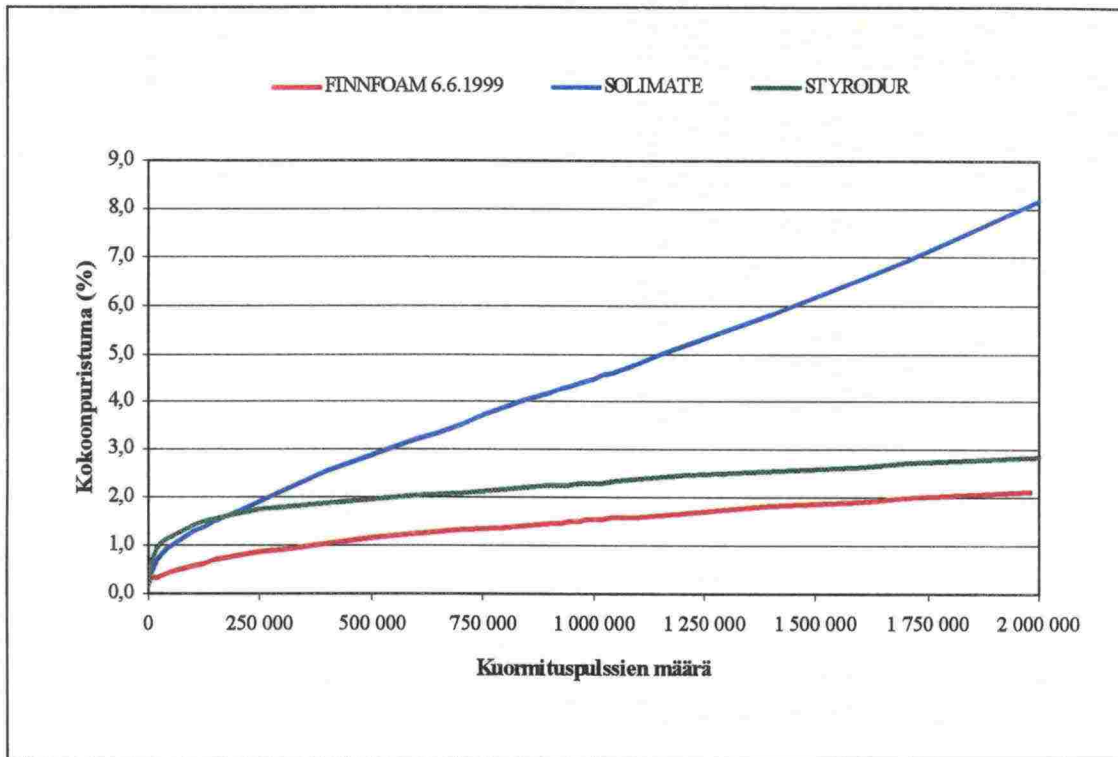
5.5.4 Levytyyppien keskinäinen vertailu

Kuten staattisen puristuskokeen tuloksista (ks. kappale 5.4.2) oli ennustettavissa, myös väsymiskoeikäyttäytymisessä oli eroja levytyyppien välillä. Laadunvalvontakokeessa käytettävällä 200 kPa:n kuormitustasolla tehdyissä väsymiskokeissa mitatut kokoonpuristumat on esitetty kuvassa 5.18. Kaikki levytyypit täyttivät RHK:n vaatimuksen enintään 5 %:n kokoonpuristumasta. Levytyyppien väliset erot tällä kuormitustasolla olivat suhteellisen pieniä Finnfoam-levyn kokoonpuristuessa kuitenkin vähiten. Erot kokoonpuristumisissa muodostuvat kuormituksen alkuvaiheissa, ensimmäisen 200.000 kuormituspulssin aikana, jonka jälkeen käyrien suuntaukset ovat varsin lähellä toisiaan. Käyrien suuntausten perusteella voidaan olettaa, että 200 kPa:n kuormitustasolla absoluuttiset erot levytyyppien välisissä kokoonpuristumisissa eivät merkittävästi suurensi lisättäessä kuormituspulssimäärää 2 miljoonasta.



Kuva 5.18. Kokoonpuristuma kuormituspulssimäärän suhteen 200 kPa:n kuormitustasolla tehdyissä väsymiskokeissa.

Suuremmalla, 275 kPa:n kuormitustasolla Solimate-levy kokoonpuristui yli kolminkertaisesti verrattuna Finnfoam- ja Styrodur-levyihin, joiden kokoonpuristuma oli keskenään likimäärin yhtä suuri (kuva 5.19). Styrodur-levyn käyttäytyminen poikkeaa jonkin verran muista tutkituista levyistä, sillä sen kokoonpuristuma 200 kPa:n kuormitustasolla on suurempi ja kuormitustason korottamisesta seuraava kokoonpuristuman lisäys vastaavasti pienempi kuin tutkituilla Finnfoam- ja Solimate-levyillä (vrt. kuva 5.15). Solimaten selvästi heikompaa käyttäytymistä selittää testatun levyn paksuus sekä tuoreus, mitkä osaltaan vaikuttivat levyn alhaisempaan puristuslujuuteen verrattuna Finnfoam- ja Styrodur-levyihin (ks. 5.4.2).

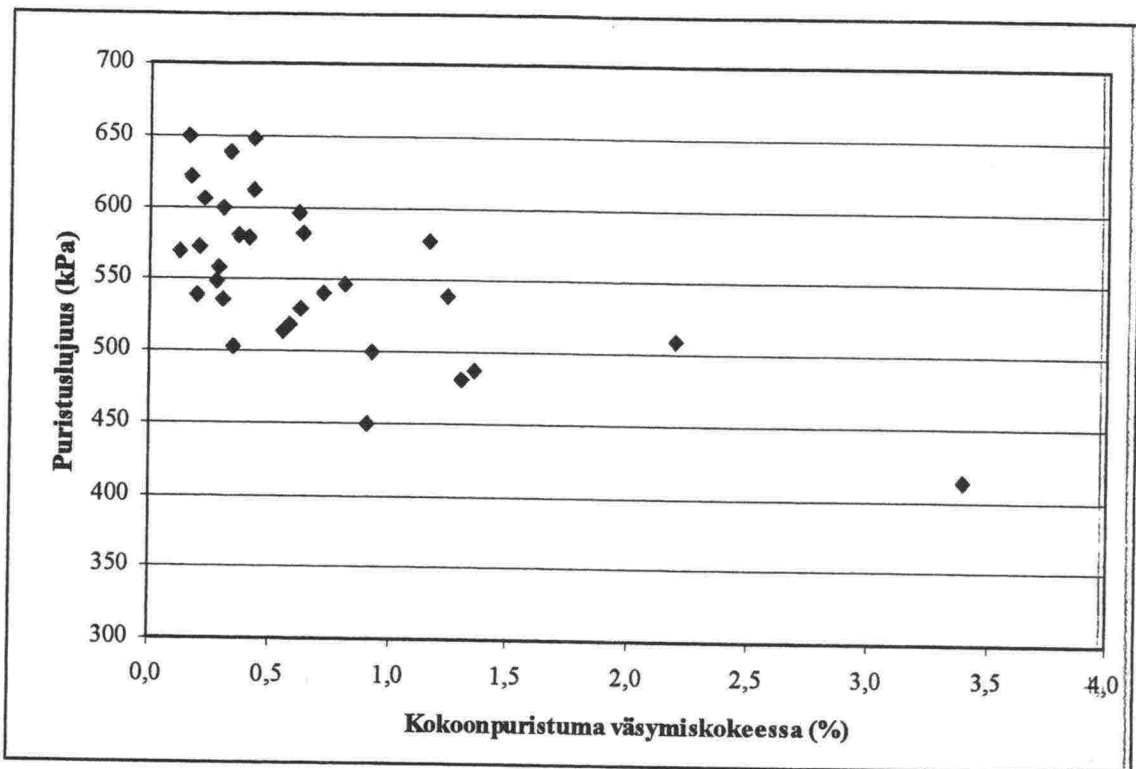


Kuva 5.19. Kokoonpuristuma kuormituspulssimäärän suhteen 275 kPa:n kuormitustasolla tehdyissä väsymiskokeissa.

5.5.5 Staattisen puristuslujuuden ja väsymiskäyttäytymisen korrelaatio

Finnfoam-levyille vuosina 1997-99 tehtyjen laadunvalvontakokeiden perusteella levyn puristuslujuuden ja väsymiskokeessa muodostuvan kokoonpuristuman välisessä yhteydessä on melko suurta hajontaa, kuten kuvasta 5.20 käy ilmi. Näin ollen levyn väsymiskäyttäytymistä ei voida ennustaa aukottomasti levyn puristuslujuuden perusteella, vaikka kuvan mukaan puristuslujuus onkin väsymiskokeessa muodostuvaan kokoonpuristumaan vaikuttavista tekijöistä selvästi merkittävin.

Tässä tutkimuksessa Finnfoam-, Solimate- ja Styrodur-levyille tehtyjen väsymis- ja puristuskokeiden tuloksista saatiin levyn puristuslujuuden ja väsymiskokeikäyttäytymisen välille kuvan 5.21 mukainen yhteys. Kuvassa on esitetty väsymiskokeissa muodostuneet kokoonpuristumat väsymiskokeen kuormitustason ja puristuslujuuden suhteen funktiona eri levytyypeille. Kuvaan on lisäksi piirretty eksponentiaalinen trendiviiva, joka on laskettu kaikista mittauksista huolimatta Styrodur-levyn hieman muista poikkeavasta käyttäytymisestä.

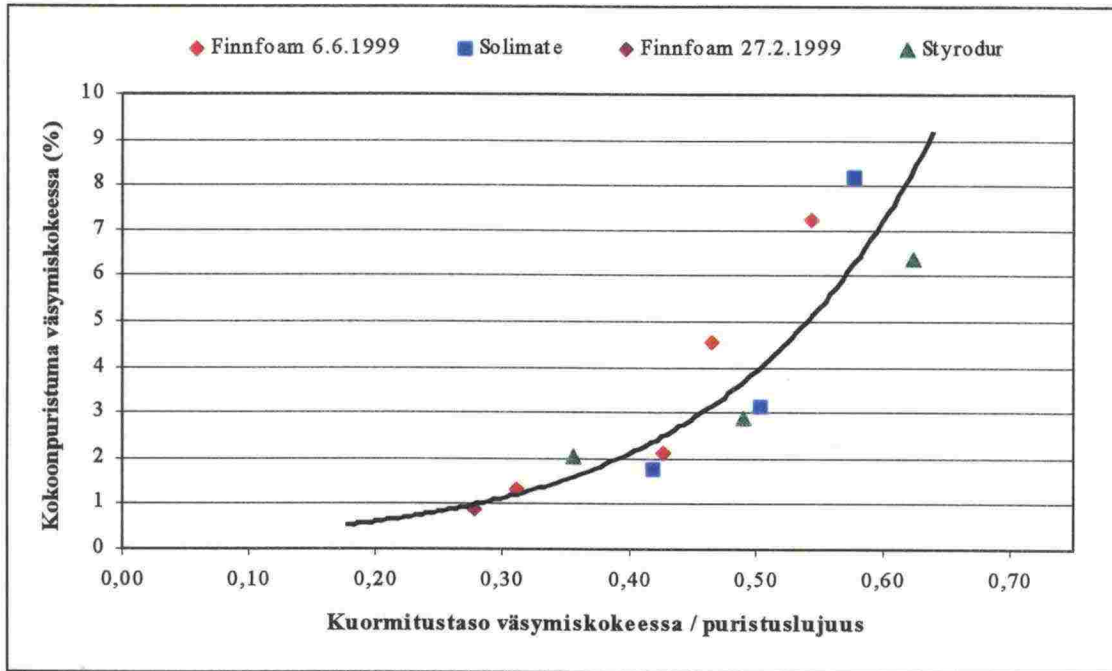


Kuva 5.20. Finnfoam-levyjen vuosien 1997-99 laadunvalvontakokeissa todettu levyn puristuslujuuden ja väsymiskokeessa muodostuvan kokoonpuristuman yhteys. Aineistosta on poistettu kolmen selvästi ongelmallisen tuotantoerän koetulokset.

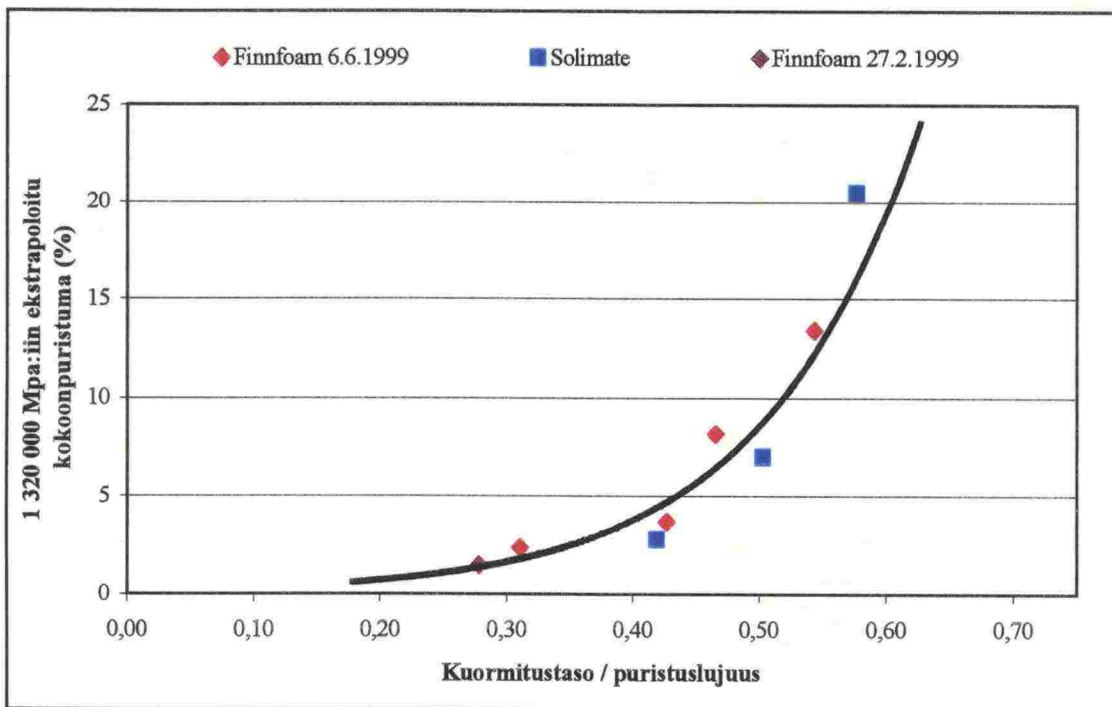
Vastaavalla tavalla kuin kappaleessa 5.5.3, 300 miljoonan bruttotonnin junakuormitusta vastaavaan kuormitukseen (1.320.000 MPa) ekstrapoloidun kokoonpuristuman riippuvuus kuormitustason ja puristuslujuuden suhteesta Finnfoam- ja Solimate-levyillä on esitetty kuvassa 5.22. Kuvan eksponentiaalisen trendiviivan perusteella on mahdollista arvioida, miten kuormitustason nousu lisää levyn vaurioitumista. Aiemmin esitetyn mukaisesti oletetaan, että akselikuorman korottaminen 225 kN:sta 250 kN:iin lisää eristelevyyn kohdistuvaa kuormitusta 99 kPa:sta 110 kPa:iin. Jos levyn puristuslujuus oletetaan heikoimmaksi vaatimuksen täyttäväksi, 450 kPa:ksi, kuormitustaso/puristuslujuus-suhde kasvaa 0,220:sta 0,244:ään, mistä seuraa 22 %:n lisäys levyn vaurioitumista kuvaavassa 300 MBT:iin ekstrapoloidussa kokoonpuristumassa. Akselikuorman korotus 225 kN:sta 300 kN:iin aiheuttaa vastaavasti 82 %:n lisäyksen levyn vaurioitumiseen. Yllä selvitetyn laskennan tulokset on kuvattu taulukossa 5.6.

Verrattaessa taulukon 5.6 tuloksia taulukon 5.5 tuloksiin havaitaan, että tutkitulle Solimate-levylle taulukossa 5.5 arvioidut akselikuorman korotuksesta aiheutuvat vaurioitumislisäykset ovat suuremmat kuin taulukossa 5.6 arvioidut vaurioitumislisäykset puristuslujuudeltaan 450 kPa olevalle levylle. Tämä johtuu siitä, että tulosten perusteella kuormitustason korottaminen lisää eniten Solimate-levyjen ja vähiten Styrodur-levyjen vaurioitumista puristuslujuudesta riippumatta. Taulukossa 5.6 arvioidut vaurioitumislisäykset on laskettu sekä Finnfoam- että Solimate-levyjen käyttäytymisen perusteella, Styrodur-levy jätettiin tarkastelun ulkopuolelle, koska sen vaurioituminen lisääntyy kuormitustasoa lisättäessä selvästi vähemmän.

Vaurioitumisen (kuormitustaso/puristuslujuus-suhteen) lisäys olisi mallin perusteella kumottavissa lisäämällä levyn puristuslujuusvaatimusta 250 kN:n akselikuorman kohdalla 500 kPa:iin ja 300 kN:n akselikuorman kohdalla 600 kPa:iin.



Kuva 5.21. Väsymiskokeessa muodostunut kokoonpuristuma kokeen kuormitustason ja koe-kappaleen puristuslujuuden suhteen funktiona.



Kuva 5.22. 300 miljoonan bruttotonnin junakuormitusta vastaavaan kuormitukseen (1.320.000 MPa) ekstrapoloitu kokoonpuristuma (ns. vertailukokoonpuristuma) kuormitustason ja levyn puristuslujuuden suhteen funktiona Finnfoam- ja Solimate-levyillä.

Taulukko 5.6. Akselipainon korottamisen aiheuttama puristuslujuudeltaan 450 kPa olevien eristelevyjen vaurioitumisen lisääntyminen (%) kuvan 5.21 mukaan.

Varmuuskerroin kohdistuvalle kuormitustasolle	levyyn	Akselikuorman korotus	
		225 kN → 250 kN	225 kN → 300 kN
1,0		22 %	82 %
1,5		35 %	146 %

5.6 Lämmönjohtavuus

Käyttämättömien levyjen lämmönjohtavuusmittausten tavoitteena oli tarjota vertailtavuutta ratanäytteistä määritetyille arvoille (ks. kappale 4.3.2). Lisäksi tutkittiin levyn painautumien ja pysyvän kokoonpuristuman merkitystä levystä mitattuun lämmönjohtavuuteen. Taulukossa 5.7 on esitetty kuvaus mitatuista kappaleista ja mittaustulokset. Mittauslaitteistoa ja -menetelmää on kuvattu kappaleessa 4.3.1 ja erillinen raportti lämmönjohtavuusmittauksista on liitteenä 2.

Taulukko 5.7. Kuvaus lämmönjohtavuusmittauksissa käytetyistä levyistä, jotka eivät ole olleet rataan asennettuna, ja niistä +10 C keskilämpötilassa mitatut lämmönjohtavuudet.

Tunnus	Levytyyppi ja Valmistusaika	Koekappaleeseen kohdistetut rasitukset	λ_{10} [W/Km]
0	Finnfoam VR-80 6.6.1999	Uusi, varastossa säilytetty levy.	0,0367
V 04	Finnfoam VR-80 6.6.1999	Uusi, varastossa säilytetty levy, jota on kuormitettu syklisesti raidesepelin välityksellä, jolloin levyn pintaan on muodostunut painaumuksia (=väsymiskoelempale V 04, ks. 5.5.2 & kuva 5.16).	0,0369
V 03	Finnfoam VR-80 6.6.1999	Uusi, varastossa säilytetty levy, jota on kuormitettu syklisesti sileiden teräslevyjen välissä, jolloin levyyn on muodostunut 7 % pysyvä kokoonpuristuma (=väsymiskoelempale V 03, ks. 5.5.2)	0,0363
V 36	Styrodur 1999	Uusi, varastossa säilytetty levy.	0,0365

Koekappaleista mitattujen lämmönjohtavuuksien voidaan todeta olevan lähes yhtä suuria, erot tuloksissa ovat mittauslaitteen tarkkuuden (1 %) suuruusluokkaa. Näin ollen sepelirakeiden kappaleeseen V 04 väsymiskokeessa muodostamien painaumien sisältämä ilma ei vääristänyt mittaustulosta sen paremmin suuremmaksi kuin pienemmäksi (vrt. 4.3.1). Tämän tiedon perusteella radasta otettujen näytelempaleiden lämmönjohtavuusmittaukset tehtiin hienoaineksesta puhdistetuista levyistä sellaisenaan, pyrkimättä tasoittamaan painaumuksia.

Koekappaleiden "V 03" ja "0" lämmönjohtavuusarvojen samansuuruisuus osoitti vastoin oletuksia, että 7 %:n kokoonpuristuma ei lisää levyn lämmönjohtavuutta. Toisaalta kokoonpuristuma lisää lämmönjohtavuutta kuitenkin epäsuorasti, sillä kokoonpuristumisen myötä solurakenne vaurioituu ja levyyn kerääntyy aiempaa enemmän kosteutta. Tuloksista voidaan todeta lisäksi, että tutkittujen Finnfoam- ja Styrodur-levyjen lämmönjohtavuudet vastasivat toisiaan hämmästyttävän hyvin.

Tärkeimpänä havaintona tehdyistä mittauksista on kuitenkin pidettävä sitä, että käyttämättömien levyjen lämmönjohtavuudet olivat selvästi suurempia kuin radasta otetuista, 0,9 - 2,0 tilavuusprosentin kosteuspitoisuuden omaavista levyistä mitatut lämmönjohtavuudet, vaikka on selvää, että levyyn sitoutuva kosteus lisää levyn lämmönjohtavuutta. Syy tähän on kuitenkin selvä; Käyttämättömät levyt on valmistettu vuonna 1999, joten ne on paisutettu hiilidioksidikaasulla (ks. 2.2.3). Radasta otetut näytekappaleet ovat peräisin aiemmin 1990-luvulla valmistetuista levyistä, jolloin ponnekaasuna käytettiin hiilidioksidia alhaisemman lämmönjohtavuuden omaavia HCFC-kaasuja. Lisäksi hiilidioksidi poistuu soluista varsin nopeasti, jolloin sitäkin suuremman lämmönjohtavuuden (vrt. taulukko 2.1) omaavat ilman typpi ja happi täyttävät solut. HCFC-kaasujen poistuminen soluista on sitä vastoin huomattavasti hitaampaa (vrt. taulukko 3.1). Näin ollen on selvää, että radasta otettujen näytelevyjen lämmönjohtavuudet ovat käyttämättömänä olleet selvästi alle 0.030 W/Km .

Edellä kuvattua ponnekaasun vaihtumisen johdosta kasvanutta lämmönjohtavuutta ei ole millään tavoin otettu huomioon routalevyjen mitoituksessa. **On selvää, että rataa asennettaessa lämmönjohtavuudeltaan 0.036 – 0.037 W/Km olevan routalevyn lämmönjohtavuus ei säily levyltä edellytettyä käyttöikää mitoitusarvon 0.037 W/Km tasolla.**

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSTARPEET

6.1 Materiaali

- Vuodesta 1981 alkaen ainoastaan suulakepuristettuja solupolystyreenilevyjä (XPS-levyjä) on käytetty roudan eristämiseen ratarakenteessa, koska aiemmin käytettyihin muottipaisutettuihin EPS-levyihin todettiin imeytyvän huomattavasti kosteutta. Nykyisten parempilaatuisten EPS-levyjen soveltuvuus roudan eristämiseen ratarakenteen kuormitusympäristössä tulisi tutkia.
- Tietoja ratarakenteeseen sijoitettujen routalevyjen asennusmääristä ja -kohteista sekä asennetuista levytyypeistä ei ole kerätty järjestelmällisesti. Paikalliset tiedot asennetuista levyistä olisi syytä koota, ja uusien asennettavien levyjen asennustiedot tallentaa keskitetysti.
- Valmisteilla oleva rakentamiskäyttöön soveltuvia XPS-levyjä koskeva tuotenormi tulee määräämään yksikäsitteisesti levyistä tutkittavat ominaisuudet ja tutkimusmenetelmät. Valmistaja on myöhemmässä vaiheessa vastuussa tuotteensa saattamisesta normin mukaiseksi ja siten CE-merkintään oikeutetuksi. Tilaajan tehtävä on asettaa raja-arvot käyttökohteeseensa soveltuvan levyn ominaisuuksille. Tämän tutkimuksen perusteella asetettiin raja-arvot ratarakenteen routaeristeeksi soveltuville XPS-levyille (ks. liite 1).
- Vuoteen 1989 asti XPS-levyjen valmistuksessa käytettiin ponnekaasuna ilmakehän otsonikerrosta tuhoavaa ja kasvihuoneilmiötä kiihdyttävää CFC 12 -yhdistettä. Ympäristövaatimusten vuoksi tuotannossa siirryttiin HFC- ja HCFC-yhdisteiden kautta käyttämään hiilidioksidia (CO_2) pääponnekaasuna. Ponnekaasun muuttumisesta oli seurauksena levyjen ns. vanhenemisilmiön (solukaasun vaihtumisen) huomattava nopeutuminen, jonka johdosta levyn lämmönjohtavuus kasvoi selvästi asennusvaiheessa. Raskasmolekyylikaasuilla paisutetun levyn lämmönjohtavuus on kuivana $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ keskilämpötilassa suuruusluokkaa $0,027\text{ W/Km}$ ja nykyisin käytettävillä ponnekaasuilla vastaavasti suuruusluokkaa $0,036\text{ W/Km}$.

6.2 Lämmönjohto-ominaisuudet

- Ratarakenteen routamitoitus perustuu osin empiiriseen Skaven-Haugin menetelmään, jossa routalevyn λ -mitoitusarvo on $0,037\text{ W/Km}$. Tämä arvo on nykyisillä ponnekaasuilla selvästi ylioptimistinen. Routaeristyksen mitoitusnomogrammi tulisi tarkistaa vertaamalla Skaven-Haugin menetelmää muihin laskentamenetelmiin kerroksellisen rakenteen roudan syvyydestä nykyisen tietämyksen mukaisilla lähtöarvoilla.
- Kirjallisuusselvityksen perusteella voidaan arvioida, että kosteutta kerääntyy nykyvaatimukset täyttävään XPS-routalevyyn noin 0,25-0,30 tilavuusprosenttia vuodessa. Tästä seuraa routalevyltä edellytetyn 40 vuoden käyttöiän aikana noin 10-12 tilavuusprosentin kosteuspitoisuus.

- Levyn kosteuspitoisuuden ja lämmönjohtavuuden välinen yhteys tulisi määrittää mittaamalla tietyn levyn lämmönjohtavuus kuivasta näytteestä ja saattaa sitten saman levyn näytekappaleita laboratorioissa eri kosteuspitoisuuksiin ja mitata näiden lämmönjohtavuus. Tutkimuksissa, joihin kirjallisuusselvityksessä perehdyttiin, oli em. yhteyttä pyritty selvittämään rakenteesta otetuista näytekappaleista. Tällaiseen menettelyyn sisältyy monia epävarmuustekijöitä, mikä voidaan todeta tulosten hajonnasta; Tutkimuksissa todettu 1 tilavuusprosentin kosteuden lisäystä vastaava lämmönjohtavuuden kasvu vaihteli välillä 0,00058 – 0,00185 W/Km.
- Mittauslämpötila vaikuttaa kuivan levyn lämmönjohtavuuteen siten, että alhaisessa (<0 °C) lämpötilassa lämmönjohtavuus on pienempi kuin suuremmassa lämpötilassa. Märän levyn kohdalla tilanne on päinvastainen johtuen jään vettä suuremmasta lämmönjohtavuudesta.
- Ratarakenteessa 3-10 vuotta olleista levyistä otettujen näytteiden perusteella voidaan routalevyjen todeta kestäneen rasitukset kohtuullisen toivotusti lukuun ottamatta neljää poikkeuksellisen heikkokuntoista näytettä. Muiden levyjen kosteuspitoisuus vaihteli välillä 0,9-3,4 tilavuusprosenttia ja näistä neljästä levystä 10 °C keskilämpötilassa mitatut lämmönjohtavuudet olivat alle 0,036 W/Km. On kuitenkin huomattava, että vaikka näytelevyt olivat kaikki HCFC- (tai HFC-) kaasulla paisutettuja, eli niillä oli rataa asennettaessa nykyisellä ponnekaasulla paisutettuihin levyihin verrattuna alhaisempi lämmönjohtavuus, kaikkien näidenkään levyjen lämmönjohtavuus ei tule säilymään 40 vuoden mitoitusaikana mitoitusarvon 0,037 W/Km puitteissa.
- Poikkeuksellisin heikkokuntoisia olivat todennäköisesti vuosien 1989-90 Finnfoam-levyistä otetut näytteet, jotka mitä ilmeisimmin eivät ole rataa asennettaessa täyttäneet nykyisiä vaatimuksia. Niiden kosteuspitoisuus oli kasvanut 7,6-21,8 tilavuusprosenttiin ja kuivimmankin näytteen lämmönjohtavuus 0,062 W/Km:iin 10 °C keskilämpötilassa mitattuna. Lisäksi osa näytteistä oli vaurioitunut erittäin pahoin. Näiden levyjen osalta voidaan lämmönvastuksen todeta alentuneen jo nyt alle 50 %:iin alkuperäisestä ja kaikkein heikoimman näytekappaleen menettäneen eristyskykynsä miltei kokonaan.

6.3 Mekaaniset ominaisuudet

- Kosteuden kerääntymisen lisäksi ratarakenteesta otetuissa levynäytteissä oli mekaanisen rasituksen aikaansaamia vaurioita. Sekä näytelevyjen ylä- että alapinnoilla oli sepelirakeiden aiheuttamia painaumuksia. Lisäksi noin puolet näytteistä oli halkeillut alapinnaltaan sekä raiteen että ratapölkyn suunnassa. Kahdessa otetussa Basfin valmistamassa näytelevyssä halkeamia ei ollut. On myös huomattava, että kahdessa tapauksessa kolmesta levyn asennussyvyys oli pienempi kuin nykyisin sallittu kv-55 cm.
- Sepelirakeiden painautumisen merkitys routalevyn toimintaan huomioidaan routamitoituksessa vähentämällä levypaksuudesta 10 mm. Etenkin ohuemmilla levyillä sepelirakeiden painaumat aiheuttavat huomattavan kustannustekijän, sillä esimerkiksi 60 mm levyn hankintakustannuksesta 17 prosenttia voidaan todeta

tena. Painaumien vähentämiseksi olisi syytä ideoida tuotantokustannuksiltaan edullinen tapa routalevyn pinnoittamiseksi jäykällä suodatinkankaalla tai vahvisteverkolla.

- Ratarakenteesta mitattujen ja mallinnettujen jännitysten perusteella 250 kN:n akseli-kuormalla routalevyn tasolla vaikuttava pystysuuntainen jännitys on noin 110 kPa. Routalevyyn kohdistuvaa kuormitusta pohdittaessa on mahdollinen dynaaminen kuormitus ja puutteellinen asennussyvyys huomioitava tietyllä varmuuskertoimella.
- Kaikki laboratoriossa tutkitut neljä käyttämätöntä levytyyppiä täyttivät RHK:n nykyiset vaatimukset levyn tiheyden, puristuslujuuden ja väsymiskokekestävyyden osalta lukuun ottamatta Solimate-levyä, jonka tiheys oli niukasti alle vaaditun 40 kg/m³.
- Levyjen asennusalustan tasaisuuden ja kantavuuden merkitys on suuri levyyn muodostuviin painaumiin ja halkeamiin sekä sitä kautta myös kosteuspitoisuuteen ja edelleen lämmönjohtavuuteen. Routalevyn alapuolisilta rakennekerroksilta vaaditut kantavuudet on oleellista selvittää, jotta niihin ei toistuvan syklisen kuormituksen alaisena muodostu routalevyn taivutusrasitusta kasvattavia epätasaisia painumia, joiden seurauksena myös radan tukemistarve kasvaa heikentyneen raidegeometrian vuoksi.
- Levyjen puristuslujuus kasvaa valmistuksen jälkeen aluksi nopeasti kasvun hidastuessa ajan myötä. Puhutaan levyn kypsymisestä. Lisäksi levyn puristuslujuus saattaa vaihdella huomattavastikin levyn leveyssuunnassa. Finfoam-levyillä oli tutkituista levyistä suurin puristuslujuus ja Solimate-levyillä heikoin, mitä osittain johtuu siitä, että Solimate-levy oli muita tutkittuja levyjä tuoreempi ja paksumpi. Jännitustaso-kokoonpuristumakäyrän muoto vaihteli puristuskokeessa levytyypistä riippuen. Murtokohdan puuttuessa ja tulosten vertailtavuuden vuoksi kokoonpuristumaa vastaava puristusjännitys olisi järkevämpää määrittää 5 % kokoonpuristumaa vastaavana nykyisen 10 % sijasta.
- Kuormitustason korottaminen väsymiskokeessa lisäsi kokeessa muodostuvaa pysyvää kokoonpuristumaa eksponentiaalisesti. Kokoonpuristuman lisäyksen suuruus riippui levytyypistä. Eniten kuormitustason nosto lisäsi Solimate-levyn ja vähiten Styrodur-levyn kokoonpuristumaa.
- Puristuslujuuden ja väsymiskokeessa muodostuvan kokoonpuristuman välillä on suuntaa antava korrelaatio. Puristuskokeella ei kuitenkaan voida kokonaan korvata väsymiskoeetta.
- Eri kuormitustasoilla tehtyjen väsymiskokeiden sekä puristuskokeiden perusteella luotiin laskentamalli akselikuorman korottamisesta aiheutuvasta routalevyn vaurioitumisen lisääntymisestä. Laskentamallissa ekstrapoloitiin väsymiskokeen kokoonpuristuman ja levyyn kohdistuneen kumulatiivisen kuormituksen yhteys 300 miljoonan bruttotonnin junakuormitusta vastaavaan kuormitukseen. Ekstrapolointi tulee tarkastaa täysimittaisilla koesarjoilla.

- Koska ratarakenteesta otetut näytekappaleet osoittivat routalevyjen kestäneen niihin kohdistuneet rasitukset kohtuullisen hyvin, lukuun ottamatta oletettavasti vuosina 1989-90 asennettuja Finnfoam-levyjä, jotka eivät mitä ilmeisimmin rataan asennettaessa täyttäneet nykyisiä laatuvaatimuksia, routalevyille kohdistettuja vaatimuksia ei ole tarpeen kiristää **nykyisillä akselikuormilla**. Toisaalta vaatimus levyiltä väsymiskokeessa vaaditusta alle 5 % pysyvästä kokoonpuristumasta ei ole sikäli mielekäs, että laadunvalvontakokeiden perusteella levyjen kokoonpuristuma on ollut hyvin harvoja poikkeuksia lukuunottamatta alle 2,5 %. Näin ollen ei voida todeta 5 % kokoonpuristumavaatimuksen olevan riittävä. Väsymiskoevaatimusta olisikin järkevää kiristää siten, että kokeessa sallitaan muodostuvaksi korkeintaan 3 %:n pysyvä kokoonpuristuma.
- Luodun laskentamallin perusteella jo asennettujen minimipuristuslujuusvaatimuksen (450 kPa) täyttävien levyjen vaurioituminen lisääntyy 22 % **siirryttäessä 225 kN:sta 250 kN:n akselikuormaan**, jos routalevyyn kohdistuvaan kuormitustasoon ei lisätä varmuutta mahdollisen puutteellisen asennussyvyyden ja dynaamisen kuormauksen vuoksi. Ottamalla kuormitustasossa huomioon varmuuskerroin 1,5, saadaan em. akselikuorman korottamista vastaavaksi vaurioitumisen lisäykseksi 35 %. Vastaavalla tavalla laskettuna vaurioitumisen lisäys **siirryttäessä 225 kN:sta 300 kN:n akselikuormaan** on 82 % - 146 % riippuen siitä, otetaanko varmuuskerroin huomioon vai ei.
- Todetun puristuslujuuden ja väsymiskoeikäyttämisen yhteyden perusteella vaurioitumisen lisääntyminen voidaan uusien rataa asennettavien levyjen osalta kumota kiristämällä puristuslujuusvaatimusta 500 kPa:iin, kun on kyse siirtymisestä 250 kN:n akselikuormiin. Siirryttäessä 300 kN:n akselikuormiin puristuslujuusvaatimusta tulisi kiristää vastaavasti 600 kPa:iin. Lisäksi akselikuorman korottamisen myötä tulisi lisätä väsymiskokeen kuormitustasoa samassa suhteessa, eli 225 kPa:iin 250 kN akselikuormalla ja 270 kPa:iin 300 kN:n akselikuormalla, ja säilyttää edellä perusteltu vaatimus korkeintaan 3 % pysyvälle kokoonpuristumalle, jotta levyjen vauriot säilyisivät nykyisellä tasolla.

LÄHDELUETTELO

1. Banverket (1996a). 30 Ton på Malmbanan. Rapport 3.4; Infrastruktur, Geoteknisk inventering. 19 s., liitteet.
2. Banverket (1996b). 30 Ton på Malmbanan. Rapport 3.7; Infrastruktur, Geoteknisk åtgärder. 50 s., liitteet.
3. Banverket (1996c). 30 Ton på Malmbanan. Rapport 4.4; Underhåll; Spårmekanisk analys. 31 s., liitteet.
4. Basf AG (1991a). Product safety data sheet. Styrodur (all grades). 05/91. 3 s.
5. Basf AG (1991b). Erfahrungen mit Frostschutzschichten aus styrodur im Gleisbau. Anwendungstechnik Styrodur. HSB/ME – D 219. 30.10.1991. 26 s.
6. Basf AG (1995). Styrodur C frei von FCKW, HFCKW und HFKW. 4 s.
7. Basf AG (1998). Anwendungstechnik Styrodur. KSB/ST – D 219. Januar 1998. 12 s.
8. Dow Europe (2000). Master safety data sheet. XPS A-N products. 18.8.2000. 5 s.
9. Dow Sverige AB (1996). Isoleringsförmåga, praktisk lambda. DOW 1996-09-01.
10. Dow Sverige AB (2000). Styrofoam lösningar. Introduktion. Ref. Nr 518. Januari 2000. 4 s.
11. Duskov, M. (1997). Materials research on EPS20 and EPS15 under representative conditions in pavement structures. Geotextiles and Geomembranes 15 (1997), s.147-181.
12. Ehrola, E. (1996). Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Helsinki, Rakennustieto Oy. ISBN 951-682-338-6. 365 s.
13. Finnfoam Oy. Finnfoam routasuojausohjeet. 22 s.
14. Finnfoam Oy (1991). VR Materiaaliyksikön tarjouspyynnön 1940/00150 mukainen tarjous suulakepuristetuista Finnfoam-eristyslevyistä. 7.3.1991. 1 s.
15. Flygare, P et al. (1989). Maakosketuksessa olevat lämmöneristeet. VTT Tiedotteita 1061. ISBN 951-38-3593-6. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 105 s.
16. Gandahl, R. (1987a). Polystyrene foam as a frost protection measure on national roads in Sweden. Frost protection and insulation for transportation facilities, Transportation Research Record 1146. Washington, D.C, Transportation Research Board. ISBN 0-309-04523-1. s. 1-9.

17. Gandahl, R. (1987b). Tjäle och tjälskydd, erfarenheter från FoU-verksamheten vid SVI och VTI. VTI meddelande 546. ISSN 0347-6049. 135 s.
18. Göbel, C. et al. (1996). Der Eisenbahnunterbau, DB-Fachbuch 8/20, Eisenbahn-Fachverlag, Heidelberg-Mainz.
19. Horvath, J. S. (1994). Expanded polystyrene (EPS) geofoam: An introduction to material behavior. Geotextiles and geomembranes 13 (1994), s. 263-280.
20. Johansen, Ö. (1982). Termisk dimensjonering av jernbanefundamenter. Frostsikring med isolasjon. Frost i jord nr. 24. Oslo. s. 27-38.
21. Jonsson, B. (1993). Tjälisolering i vägar, Varme- och fuktteknisk funktion. Laboratorieprovningar, provuttag från vägar. SP Rapport 1993:06. Borås, Swedish National Testing and Research Institute. ISBN 91-7848-389-1. 27 s. + 24 liites.
22. Kokko, E. (1986). Raskasmolekyylikaasulla paisutettavien solumuovieristeiden vanheneminen. RIL K62-1986. Lämmöneristyspäivät. ISBN 951-758-122-X. s. 111-129.
23. Kokko, E. (1987). Lämmöneristeiden pitkäaikaisominaisuudet. RIL K85-1987, Lämmöneristyspäivä 1987. ISBN 951-758-156-4. s. 73-92.
24. Kolisoja, P. (1997). Resilient deformation characteristics of granular materials. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, julkaisuja 223. 188 s., 13 liites.
25. Kolisoja, P. et al. (1999). Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 6/1999. Helsinki, Ratahallintokeskus Tekninen yksikkö. 135 s.
26. Kolisoja, P. et al. (2000). Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 5/2000. Helsinki, Ratahallintokeskus Tekninen yksikkö. 137 s.
27. Ketonen, P et al. (1999) Esiselvitys routalevyistä. 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Teknillinen korkeakoulu, Tielaboratorio. 12 s. + 13 liites.
28. Mustonen, J. (1991). Lämpöeristeiden käyttö rautatierakenteissa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto. 122 s.
29. Myyrä, V. (1976). Ratojen routiminen ja routimishaittojen poistaminen, Rataosaston neuvottelupäivät 13.-14.10.1976. 16 s.
30. Myyrä, V. (1983). Solumuovin käyttö radan eristämiseen. Rakennustekniikka nro. 6/1983.
31. Nieminen, H. ja Järvelä, P. (1999). Uuden sukupolven lämmöneriste. Tampereen teknillinen korkeakoulu, materiaaliopin laitos, muovitekniikka. Raportti 17/99. ISBN 952-15-0193-6. 29 s.

32. Nordal, R. S. & Refsdal, G. (1989). Frost protection in design and construction. VTT Symposium 94. Frost in geotechnical engineering Volume 1. VTT Espoo. s. 127-163.
33. Norges teknisk-naturvitenskapelige forskningsråd og statens vegvesens utvalg for Frost i jord. (1976). Sikring mot teleskader. Frost i jord nr. 17. Oslo. ISBN 82-7207-007-3.
34. Nurmikolu, A. (2000). Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2000. Helsinki, Ratahallintokeskus Tekninen yksikkö. 93 s., 34 liites.
35. Orama, R. (1985). Pitkäaikaishavaintoja tierakenteeseen sijoitetuista solumuoveista. Tie ja Liikenne 1/1985. s. 34-38.
36. prEN 13164 (2000). DRAFT: Thermal insulation products for road, traffic areas, railways and embankment filling – Factory made products of extruded polystyrene foam (XPS) – Specification. European Committee for Standardization. 38 s.
37. Ratahallintokeskus (1998). Päällysrakennetöiden yleiset laatuvaatimukset, PYL. Tukikerroksen vaihto-/puhdistustyön yleiset laatuvaatimukset. Helsinki, Ratahallintokeskus. 8 s.
38. Ratahallintokeskus. (1999a). Rautateiden maarakennustöiden yleinen työselitys ja laatuvaatimukset (RMYTL). Osa 5 Maaleikkaus ja pengerrystyöt. Helsinki, Ratahallintokeskus. 65 s.
39. Ratahallintokeskus (1999b). Ratateknilliset määräykset ja ohjeet, osa 3, Radan rakenne. Helsinki, Ratahallintokeskus. 99 s., 47 liites.
40. Refsdal, G. (1987). Frost protection of road pavements with insulating boards. Norwegian practice and experience. Frost i jord nr. 26, Frost action in soils. Oslo. s. 3-10.
41. Sandegren, E. (1977). Cellplast användning för lösande av ingenjörgeologiska problem inom Statens Järnvägar. Frost i jord nr. 18. Oslo. s. 35-41.
42. Sandegren, E. (1987). The use of cellular plastics in Swedish railways to insulate the track against frost. Frost protection and insulation for transportation facilities, Transportation Research Record 1146. Washington, D.C, Transportation Research Board. ISBN 0-309-04523-1. s. 28-32.
43. Selig, E. T. & Waters, J. M. (1994). Track geotechnology and substructure management. London, Thomas Telford Publications. ISBN 0 7277 2013 9. 407 s.
44. SFS-EN 826 (1996). Lämmöneristetuotteet rakentamiskäyttöön. Kokoonpuristuvuuden määrittäminen. Suomen standardisoimisliitto SFS. 9 s.

45. Suomen rakennusinsinöörien liitto (1979). Lämmön- ja kosteudeneristys. RIL 117. ISBN 951-758-012-6. Helsinki.
46. Talonrakennuksen routasuojausohjeet (1997). Helsinki, VTT Yhdyskuntatekniikka. Rakennustieto. Helsinki. 94 s.
47. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Geotekniikan laboratorio (1998). Routaeristelevyn väsytystestaus. Testausohje no: GEOT/16.
48. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Geotekniikan laboratorio (1999). Finnfoam-eristelevyn testaus. Työ numero 911. 19.3.1999. 7 s.
49. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikan laboratorio (2000). Käytettyjen XPS-rataeristeiden lämmönjohtavuuden määrittäminen. Tutkimusraportti 1015. 5 s.
50. ThermiSol Finland Oy (1999). Isora-Super SPS lämmöneristelevyt vaativiin olosuhteisiin. 7.6.1999. 8 s.
51. UIC CODE 719 R. (1982). Earthworks and Trackbed Construction for Railway Lines. International Union of Railways. 1st Edition.
52. Valtionrautatiet (1981). Solumuovilevyjen käyttö routimishaittojen estämiseksi. Rkt 125/34/81. Valtionrautatiet Rakennustoimisto. 3 s.
53. Valtionrautatiet (1991). Rautatien routaeristeinä käytettävien solumuovilevyjen laatuvaatimukset. Helsinki, VR ratayksikkö.
54. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (1980). Rautatierakenteissa käytettävien solumuovilevyjen lämmönjohtavuus. Tutkimusraportti no: GEO 0166. VTT Geotekniikan laboratorio. 7 s.
55. VR-Rata Oy (1998). Tarjouspyyntö nro 8940/00900, Solumuovilevyt. 11.12.1998. 7s.
56. Ympäristöministeriö (1998). Ympäristöministeriön tyypin hyväksyntäpäätös 94/6121/98, Finnfoam-eristyslevy. Ympäristöministeriö Asunto- ja rakennusosasto. 8.6.1998. 2 s.
57. Kankare, E. (1986). Routimisen vähentäminen. RIL K66-1986 Routa maa- ja pohjarakentamisessa. ISBN 951-785-117-3. s. 99-114.

Liite 1

XPS-Routalevyjen tekniset toimitusehdot

2 sivua

XPS-ROUTALEVYJEN TEKNISET TOIMITUSEHDOT

1. Sovellusalue

Tässä esitetyt tekniset toimitusehdot koskevat ratarakenteessa routalevyinä käytettäviä suulakepuristettuja solupolystyreenilevyjä eli XPS (eXtruded PolyStyrene) –levyjä. Routalevyjen käyttö on tarkemmin esitetty Ratahallintokeskuksen (RHK) ohjeessa ”Ratateknilliset määräykset ja ohjeet (RAMO) osa 3, Radan rakenne”.

2. Laatuvaatimukset

Toimitettavan tuotteen tulee olla suulakepuristettua solupolystyreeniä. Tuotteen tulee täyttää siitä normin prEN 13164 mukaisesti määritettäville ominaisuuksille taulukossa 2.1 asetetut vaatimukset. Valmistajan tulee ilmoittaa tilaajalle raja-arvot tuotteestaan normin prEN 13164 mukaisesti määritetyille, taulukossa 2.1 asetetuille ominaisuuksille. *Myöhemmässä vaiheessa tuotteen tulee olla yhtäpitävä normin prEN 13164 kanssa ja olla varustettu tämän osoittavalla CE-merkinnällä.*

Taulukko 2.1. Vaatimustasot tuotteesta määritettäville ominaisuuksille. Kaikki ominaisuudet tulee määrittää normin prEN 13164 mukaisella tavalla. Vaadittujen luokkien raja-arvot käyvät ilmi normista prEN 13164.

OMINAISUUS	VAATIMUS	MAKSIMI- POIKKEAMA	TESTINORMI
Lämmönjohtavuus	???		prEN 12667
Pituus	4000 mm	+ - 10 mm	EN 822
Leveys	600 mm	+ - 8 mm	EN 822
Paksuus	40, 60, 80 tai 100 mm	T1	EN 823
Suorakulmaisuus pituus- ja leveys- suunnassa		5 mm/m	EN 824
Suorakulmaisuus paksuussuunnassa		40 mm/m	EN 824
Tasomaisuus		28 mm	EN 825
Puristuslujuus tai 5 % kokoonpuristumaa vastaava puristusjännitys	CS(10\Y) 500		EN 826
Syklisen rasituksen kestävyys	???		???
Vedenimeytyminen upotettuna	WL (T) 2		EN 12087
Vedenimeytyminen diffuusiosta	WD (V) 5		EN 12088
Jäätymis- sulamissykliä kestävyys	FT 1		EN 12091
Vaarallisten aineiden vapautuminen	3)		

¹⁾ Vaatimusten mukaiset lukuarvot täydennetään prEN 13164 normin valmistuttua.

²⁾ Paksuudeltaan 60, 80 ja 100 mm levyjen pitkällä sivuilla tulee olla 60 mm syvyinen puoliponttaus, jolloin levyn etenemä on 540 mm. Paksuudeltaan 40 mm levyissä ei ponttausta.

³⁾ Tuotteen tulee täyttää lainsäädännössä asetetut vaarallisia aineita koskevat säädökset.

3. Laadunvalvonta

3.1 Valmistajan suorittama laadunvalvonta

Levyjen valmistajan tulee suorittaa laadunvalvontaa normissa prEN 13164 määrättyllä tavalla. Levyjen valmistaja on velvollinen ilmoittamaan toimitetusta tuotantoerästä tehtyjen laadunvalvontakokeiden tulokset lämmönjohtavuuden ja puristuslujuuden tai puristusjännityksen osalta.

3.2 Kolmannen osapuolen suorittama laadunvalvonta

Kauppasopimuksessa erikseen sovittava, puolueeton kolmas osapuoli suorittaa laadunvalvontaa taulukossa 2.1 määrättyjen ominaisuuksien osalta. Kolmannen osapuolen laadunvalvontakokeissa käytettävien levyjen valinta sovitaan yhdessä tilaajan ja valmistajan edustajan kanssa. Sanktiot mahdollisista kolmannen osapuolen laadunvalvonnassa havaituista laadun alituksista määrätään kauppasopimuksessa.

4. Tuotteen merkintä

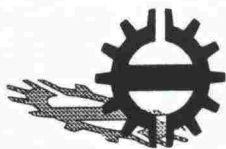
Tuotetunnistekoodi tulee antaa normin prEN 13164 mukaisesti. *Normin prEN 13164 kanssa yhtäpitävät tuotteet tulee merkitä normin prEN 13164 mukaisesti.*

Liite 2

Lämmönjohtavuusmittausten tutkimusselostus

TTKK / Talonrakennustekniikan laboratorio

9 sivua

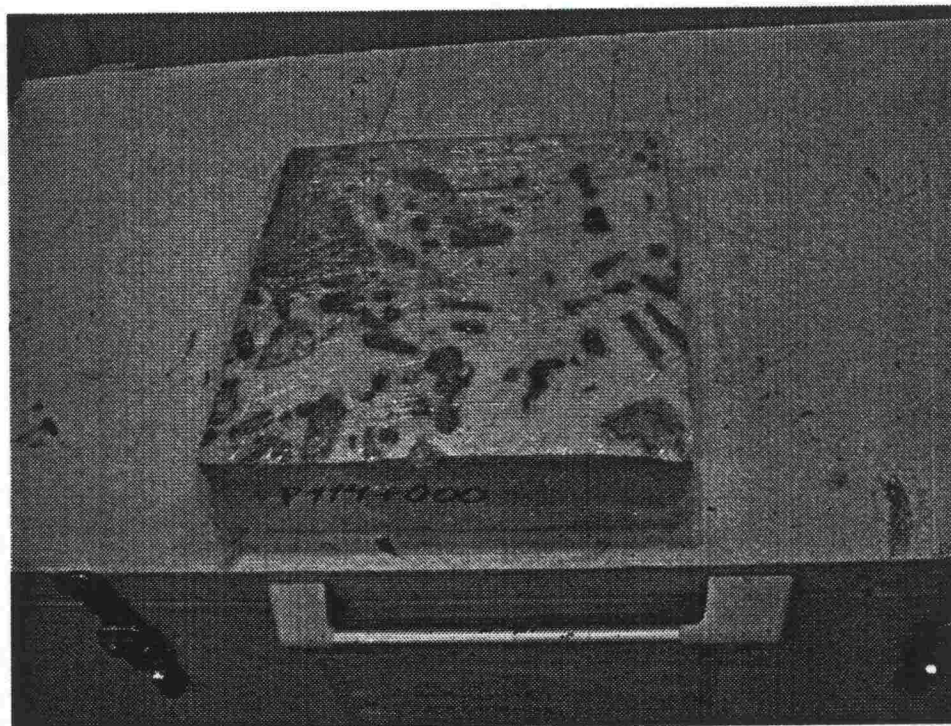


TAMPEREEN TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Rakennustekniikan osasto
Rakennetekniikan laitos
Talonrakennustekniikan laboratorio

Tutkimusselostus 1015

Käytettyjen XPS-rataeristeiden lämmönjohtavuuden määrittäminen

Tilaaaja: Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600
33100 Tampere





Sisällysluettelo

1. Näytteet.....	2
2. Testausmenetelmä	2
2.1 Menetelmän yleiskuvaus	2
2.2 Mittauslaite	2
3. Koejärjestely.....	3
3.1 Koekappaleiden säilytys	3
3.2 Mittausohjelma.....	3
4. Mittausajankohta	3
5. Tulokset	3
6. Johtopäätökset.....	5

Liitteet

Liite 1. Koekappaleiden lämmönjohtavuus tiheyden funktiona (1 s.)

Liite 2. Valokuvia koelaitteistosta ja koekappaleista (2 s.)



1. Näytteet

Tilaaaja toimitti tutkimuksia varten 9 kpl XPS-levyistä leikattuja koekappaleita. Koekappaleista neljä oli leikattu käyttämättömistä ja viisi käytetyistä eristelevyistä. Käyttämättömistä eristeistä kahdelle oli tehty kuormituskokeita geotekniikan laboratoriossa. Käytetyistä levyistä otetut näytteet oli kääritty ohuen muovikalvon sisään. Käytetyt eristeet oli otettu Lahden ja Luumäen väliseltä rataosuudelta. Näytteet vastaanotettiin viikolla 39.

Tilaaaja oli numeroinut koekappaleet seuraavasti:

00	Käyttämätön eriste, valmistaja Finnfoam Oy, Suomi, 1997
V3	Käyttämätön eriste, samaa valmistuserää kuin kappaleet 00 ja V4. Kuormitettu väsytykskokeessa 350 kPa paineella.
V4	Käyttämätön eriste, samaa valmistuserää kuin kappaleet 00 ja V3. Kuormitettu väsytykskokeessa 200 kPa paineella.
V36	Käyttämätön eriste, valmistaja BASF, Saksa, 1999
P173+750	Käytetty eriste, valmistaja BASF, Saksa. Asennusvuosi 1994.
E198+670	Käytetty eriste, valmistaja DOW, Ruotsi. Asennusvuosi 1992.
P114+000	Käytetty eriste, valmistaja Finnfoam Oy, Suomi. Asennusvuosi 1997.
E207+200	Käytetty eriste, valmistaja Finnfoam Oy, Suomi. Asennusvuosi 1989 tai 1990.
P201+738	Käytetty eriste, valmistaja DOW, Ruotsi. Asennusvuosi 1992.

Näytteen V4 sekä kaikkien käytetystä materiaalista leikattujen koekappaleiden toisessa pinnassa oli sepelirakeiden painamia kuoppia. Osa käytetystä materiaalista otetuista koekappaleista oli lisäksi selvästi kosteita.

2. Testausmenetelmä

2.1 Menetelmän yleiskuvaus

Mittaukset suoritettiin lämpövirtalevylaitteen avulla. Lämpövirtalevylaitteen pääosat ovat ylä- ja alalevy, kaksi lämpövirtalevyä sekä suojakuori. Mitattava kappale asetetaan ylä- ja alalevyn väliin ja lämpövirtalevyt ovat ylälevyn ja koekappaleen sekä vastaavasti alalevyn ja koekappaleen välissä. Ylä- ja alalevyjen lämpötilat säädetään eri suuruisiksi, jolloin niiden välille muodostuu lämpötilagradientti. Tämä aiheuttaa ylä- ja alalevyn välille lämpövirran, jonka suuruus mitataan lämpövirtalevyillä.

Mittaukset suoritettiin pääpiirteittäin standardin ISO 8301 (1991) ”Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus” /1/ mukaisesti. Mittauksessa koekappale oli vaakasuorassa ja lämpövirran suunta oli pystysuora.

2.2 Mittauslaite

Käytetty lämpövirtalaite oli mallia LaserComp FOX304, sarjanumero 00060355 (liite 2, kuva 1). Laitteen mittaustarkkuus on valmistajan ilmoituksen mukaan $\pm 1\%$.



Laite on kalibroitu LaserComp Oy:n tehtaalla. Yhtiön kalibroittoimintaa valvoo National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA. Laitteen kalibrointi tarkastettiin ennen mittauksia Huurre Group Oy:n Ylöjärven tehtaiden kalibrointitarkastuskappaleella. Kappale on mineraalivillalevy, jonka kalibrointipaikka on VTT, Espoo.

3. Koejärjestely

3.1 Koekappaleiden säilytys

Koekappaleita säilytettiin ennen $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ keskilämpötilassa tehtyjä mittauksia TTKK:n rakennushallin mittaushuoneessa noin $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Koekappaleita E198+670, P114+000, P173+750, E207+200 ja P201+738 säilytettiin muovikalvoon käärittyinä. Ennen $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ keskilämpötilassa tehtyjä mittauksia kappaleita pidettiin viikon ajan säilytyskaapissa $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa.

Koekappaleiden pintoja ja reunoja ei tasattu erikseen, poikkeuksena koekappaleelle E198+670 lopuksi tehty mittaus, jossa koekappaleen yläpinnan kolot täytettiin hiekalla.

3.2 Mittausohjelma

Kaikkien koekappaleiden lämmönjohtavuudet mitattiin $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ keskilämpötilassa. Tämän jälkeen käytetyistä eristeistä otettujen kappaleiden lämmönjohtavuudet mitattiin $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ keskilämpötilassa. Lämpövirtalevylaitteen ylä- ja alalevyn välinen lämpötilaero oli kaikissa kokeissa $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Lämpövirtalevyalaite mittasi automaattisesti koekappaleen paksuuden ennen kunkin mittauksen alkua. Käytetyistä eristeistä otettujen kappaleiden tiheys mitattiin ennen lämmönjohtavuuden mittausta sekä sen jälkeen. Ne testattiin muovikalvoon käärittyinä, koska osa niistä oli selvästi kosteita.

Kappaleiden pinnassa olleiden kolojen vaikutusta arvioitiin täyttämällä koekappaleen E198+670 pinnan kolot hiekalla ja mittaamalla kappaleen lämmönjohtavuus $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ keskilämpötilassa. Tulosta verrattiin samalle kappaleelle ennen hiekkatäyttöä tehtyihin mittauksiin. Muissa mittauksissa koloja ei täytetty mitenkään.

Liitteessä 2 on esitetty valokuvia mitatuista koekappaleista.

4. Mittausajankohta

Mittaukset suoritettiin 27.9. – 9.10.2000.

5. Tulokset

Käyttämättömien eristelevyjen lämmönjohtavuusmittausten tulokset on esitetty taulukossa 1 ja käytettyjen eristelevyjen taulukoissa 2 ja 3. Liitteessä 1 on esitetty kuvaajia lämmönjohtavuuden muutoksesta koekappaleen tiheyden funktiona.



Taulukko 1: Käyttämättömästä eristeestä valmistettujen koekappaleiden lämmönjohtavuusmittaukset keskilämpötilassa +10 °C

Koekappale nro	00	V3	V4	V36
Paksuus d (mm)	80,57	74,65	80,40	81,18
Tiheys ρ (kg/m ³)	40,2	42,9	40,5	38,4
Ylälevyn lämpötila T_U (°C)	+0,01	+0,01	+0,01	+0,01
Alalevyn lämpötila T_L (°C)	+20,01	+20,01	+20,01	+20,01
Keskilämpötila T_m (°C)	+10,01	+10,01	+10,01	+10,01
Lämpötilaero ΔT (°C)	20,00	20,00	20,00	20,00
Lämmönjohtavuus näytteen yläpinnassa λ_U (W/mK)	0,0375	0,0371	0,0380	0,0373
Lämmönjohtavuus näytteen alapinnassa λ_L (W/mK)	0,0358	0,0355	0,0358	0,0357
Keskimääräinen lämmönjohtavuus λ_{10} (W/mK)	0,0367	0,0363	0,0369	0,0365

Taulukko 2: Käytetyistä eristeistä valmistettujen koekappaleiden lämmönjohtavuusmittaukset keskilämpötilassa +10 °C

Koekappale nro	E198+670	P114+000	P173+750	E207+200	P201+738
Paksuus d (mm)	81,26	81,69	82,84	96,17	83,17
Tiheys ρ ennen mittausta (kg/m ³)	88,4	51,6	54,9	116,5	72,9
Tiheys ρ mittauksen jälk. (kg/m ³)	88,2	51,7	54,9	116,5	72,9
Ylälevyn lämpötila T_U (°C)	+0,01	+0,01	+0,01	+0,01	+0,01
Alalevyn lämpötila T_L (°C)	+20,01	+20,01	+20,01	+20,01	+20,02
Keskilämpötila T_m (°C)	+10,01	+10,01	+10,01	+10,01	+10,02
Lämpötilaero ΔT (°C)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,01
Lämmönjohtavuus näytteen yläpinnassa λ_U (W/mK)	0,0382	0,0323	0,0311	0,0692	0,0346
Lämmönjohtavuus näytteen alapinnassa λ_L (W/mK)	0,0333	0,0290	0,0273	0,0537	0,0326
Keskimääräinen lämmönjohtavuus λ_{10} (W/mK)	0,0358	0,0307	0,0293	0,0615	0,0336

Taulukko 3: Käytetyistä eristeistä valmistettujen koekappaleiden lämmönjohtavuusmittaukset keskilämpötilassa -5 °C

Koekappale nro	E198+670	P114+000	P173+750	E207+200	P201+738	E198+670 hiekatäyttö
Paksuus d (mm)	81,61	81,47	82,84	95,66	83,01	82,10
Tiheys ρ ennen mittausta (kg/m ³)	90,9	51,8	54,9	117,4	73,1	121,7
Tiheys ρ mittauksen jälk. (kg/m ³)	90,8	51,8	54,9	117,3	73,1	121,7
Ylälevyn lämpötila T_U (°C)	-15,00	-15,00	-15,00	-15,00	-15,00	-15,00
Alalevyn lämpötila T_L (°C)	+5,01	+5,01	+5,01	+5,01	+5,01	+5,01
Keskilämpötila T_m (°C)	-4,99	-4,99	-4,99	-4,99	-4,99	-4,99
Lämpötilaero ΔT (°C)	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01
Lämmönjohtavuus näytteen yläpinnassa λ_U (W/mK)	0,0398	0,0310	0,0308	0,0879	0,0337	0,0397
Lämmönjohtavuus näytteen alapinnassa λ_L (W/mK)	0,0351	0,0286	0,0271	0,0601	0,03367	0,0380
Keskimääräinen lämmönjohtavuus λ_{-5} (W/mK)	0,0375	0,0298	0,0290	0,0741	0,0337	0,0389



6. Johtopäätökset

Käyttämättömien levyjen lämmönjohtavuuksissa ei ollut suurta eroa. Sepelirakeiden aiheuttamat kuopat levyn pinnassa eivät näyttäneet vaikuttavan merkittävästi mittaustuloksiin.

Käytettyjen eristeiden lämmönjohtavuus vaihteli huomattavasti. Näytteen E207+200 poikkeuksellisen korkea lämmönjohtavuusarvo kertoo kyseisen koekappaleen korkeasta kosteuspitoisuudesta. Näytteiden P114+000, P173+750 sekä P201+738 lämmönjohtavuusarvot sen sijaan olivat jopa alhaisempia kuin käyttämättömälle eristeelle saadut. Käyttämättömien ja käytettyjen eristelevyjen lämmönjohtavuuksien vertailu on kuitenkin hankalaa, koska koekappaleet on otettu eri valmistuseristä tai eri valmistajien levyistä.

Näytteen E198+670 lämmönjohtavuus kasvoi noin 4 %, kun näytteessä olleet, sepelin jättämät kolot täytettiin hiekalla.

Yleisimpien eristemateriaalien lämmönjohtavuusarvot kasvavat koekappaleen lämpötilan noustessa, mikäli materiaalin kosteuspitoisuus on tietyn rajan alapuolella. Tässä tutkimuksessa kolmen koekappaleen (E198+670, E207+200 ja P201+738) lämmönjohtavuus kuitenkin nousi keskilämpötilan laskiessa pakkasen puolelle. On ilmeistä, että syynä tähän oli eristeiden korkea kosteuspitoisuus, koska veden jäätyessä sen lämmönjohtavuus kasvaa. Merkillepantavaa on, että koekappaleiden tiheyden ja lämmönjohtavuuden välillä on havaittavissa yhteys (liite 1).

Tutkimustulokset koskevat vain tässä tutkimusselostuksessa mainittuja koekappaleita.

TTKK:n nimen käyttäminen mainonnassa sekä tämän tutkimusselostuksen osittainen julkaiseminen tai kopiointi on sallittu vain TTKK:n kirjallisella luvalla.

Tampereella 20.10.2000

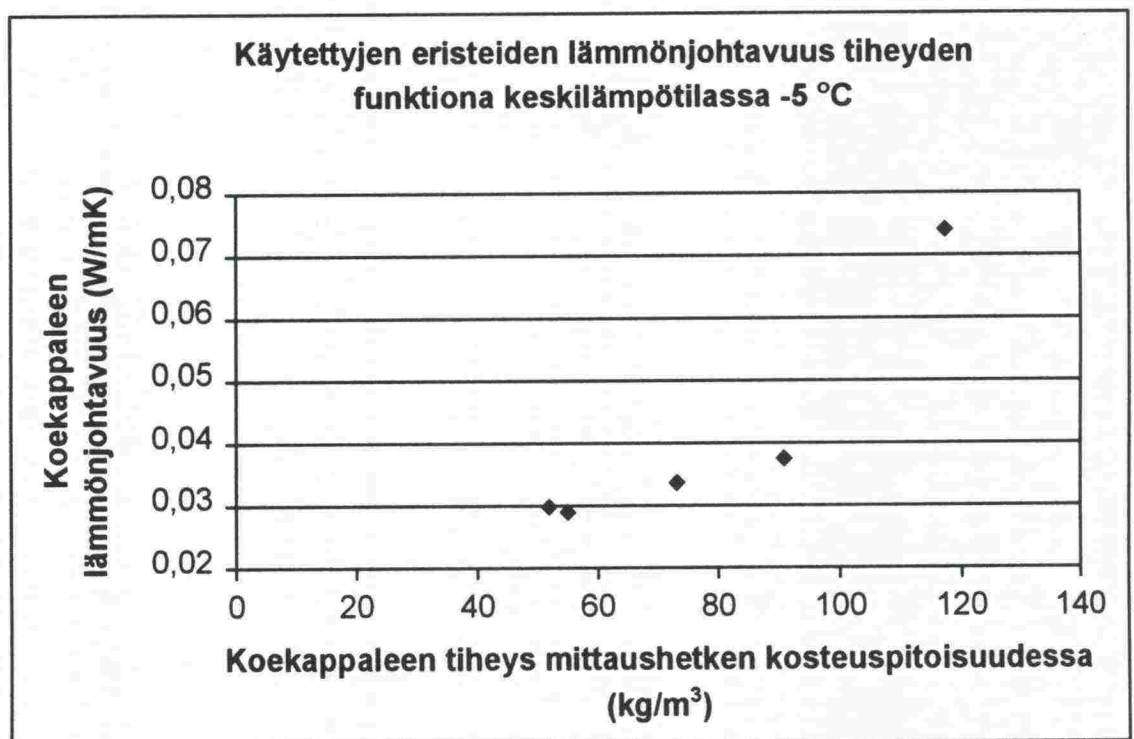
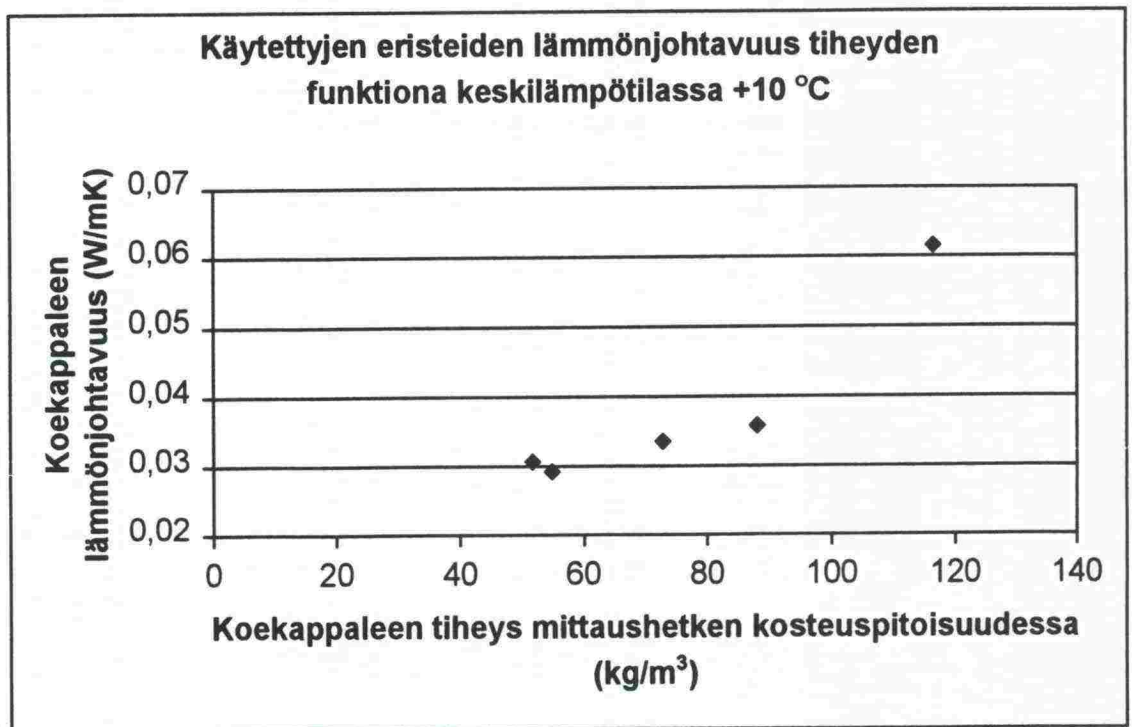
Laboratorion johtaja
prof. Ralf Lindberg

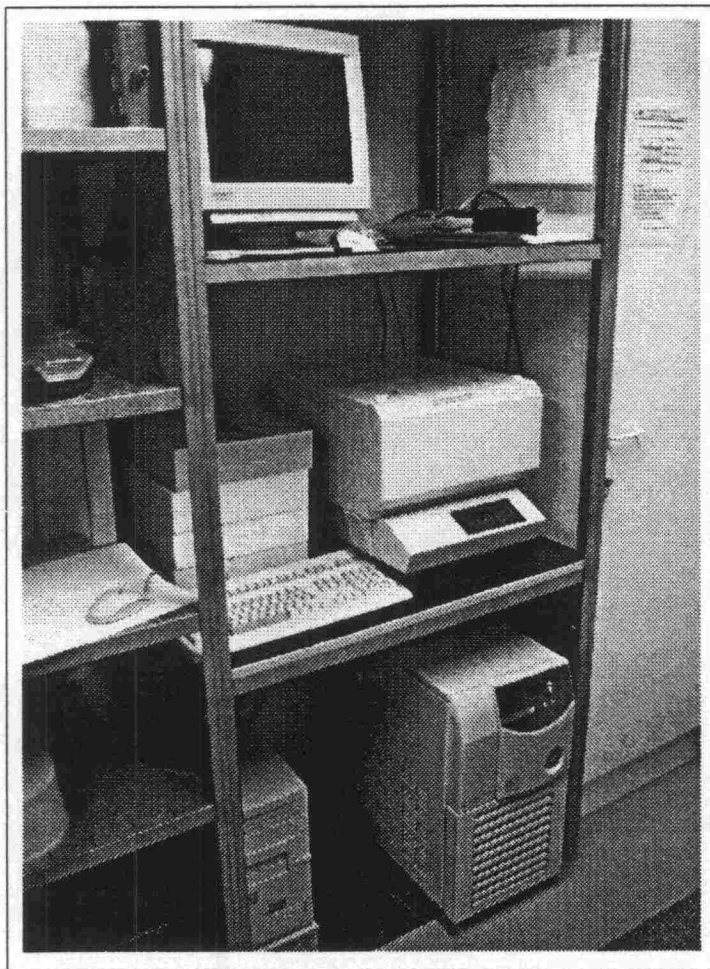
Erikoistutkija
tekn. lis. Juha Vinha

Tutkija
dipl.ins. Ilkka Valovirta

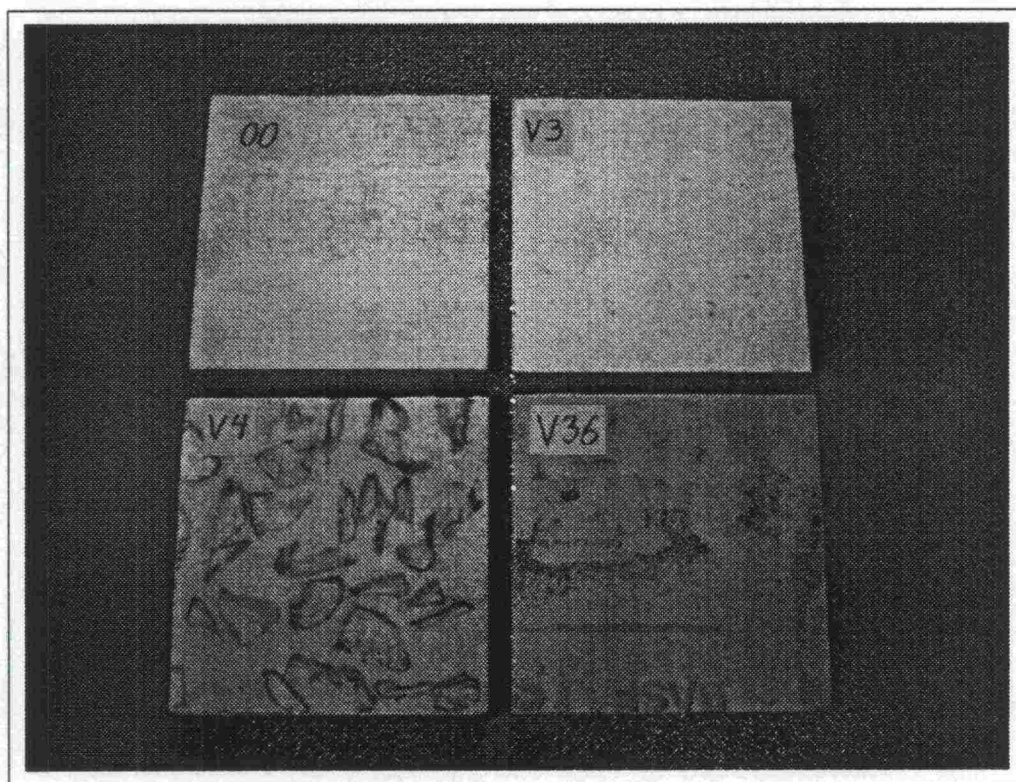
Lähteet

1. ISO 8301 (1991): Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus

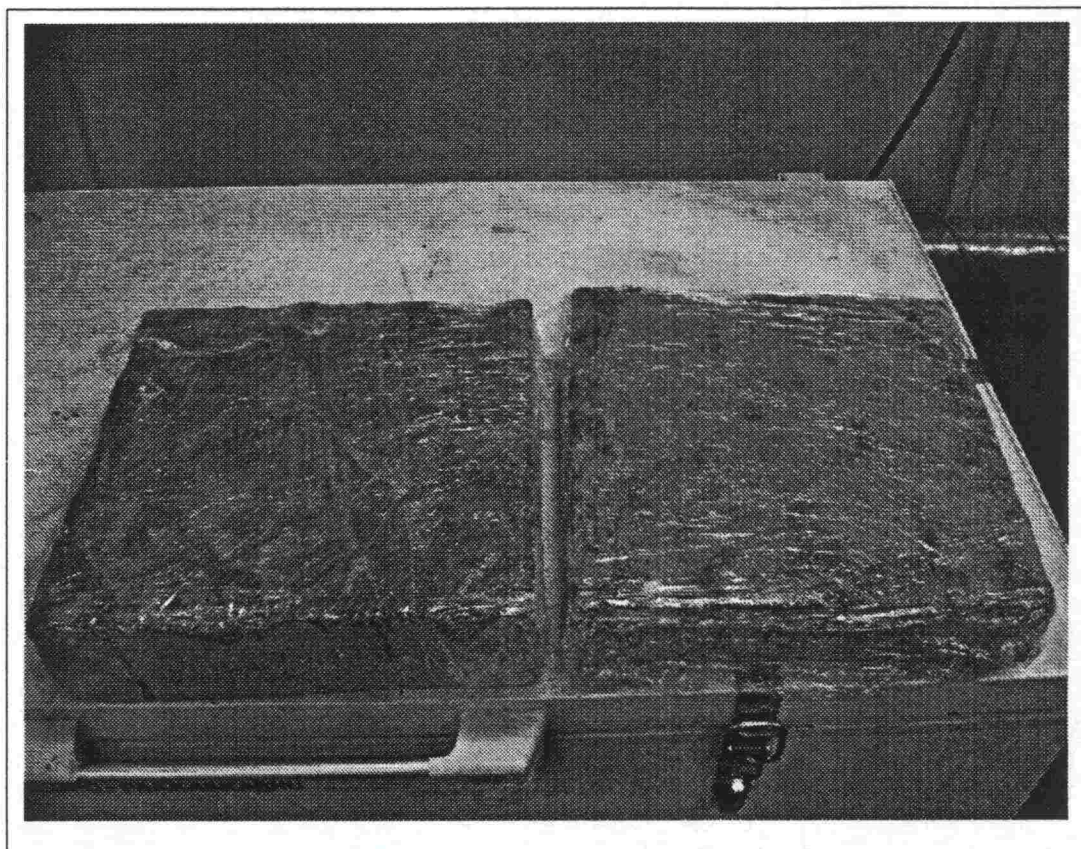




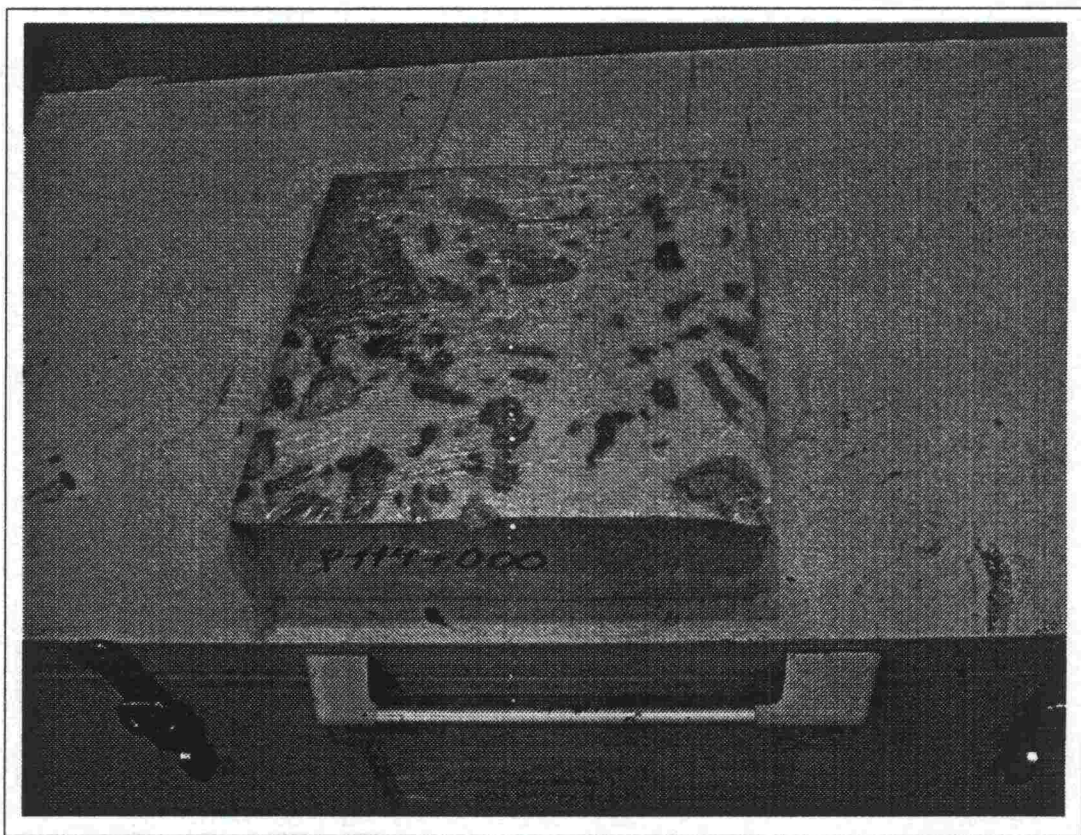
Kuva 1. Koelaitteisto. Varsinainen lämpövirtalevylaitte keskimmaisella hyllyllä ja sen alapuolella lisäjäähdytin.



Kuva 2. Käyttämättömästä eristeestä valmistetut koekappaleet.



Kuva 3. Koekappale P201+738 (vas.) sekä koekappale E198+670, jonka yläpinta on peitetty hiekalla.



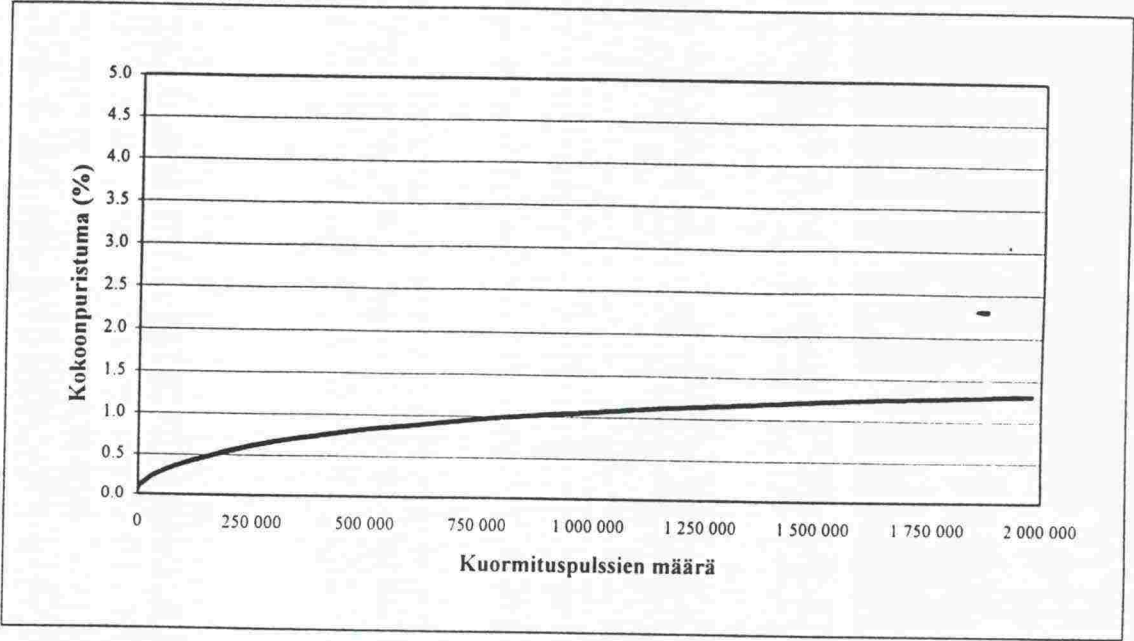
Kuva 4. Koekappale P114+000. Sepelin jättämät jäljet näkyvät hyvin.

Liite 3

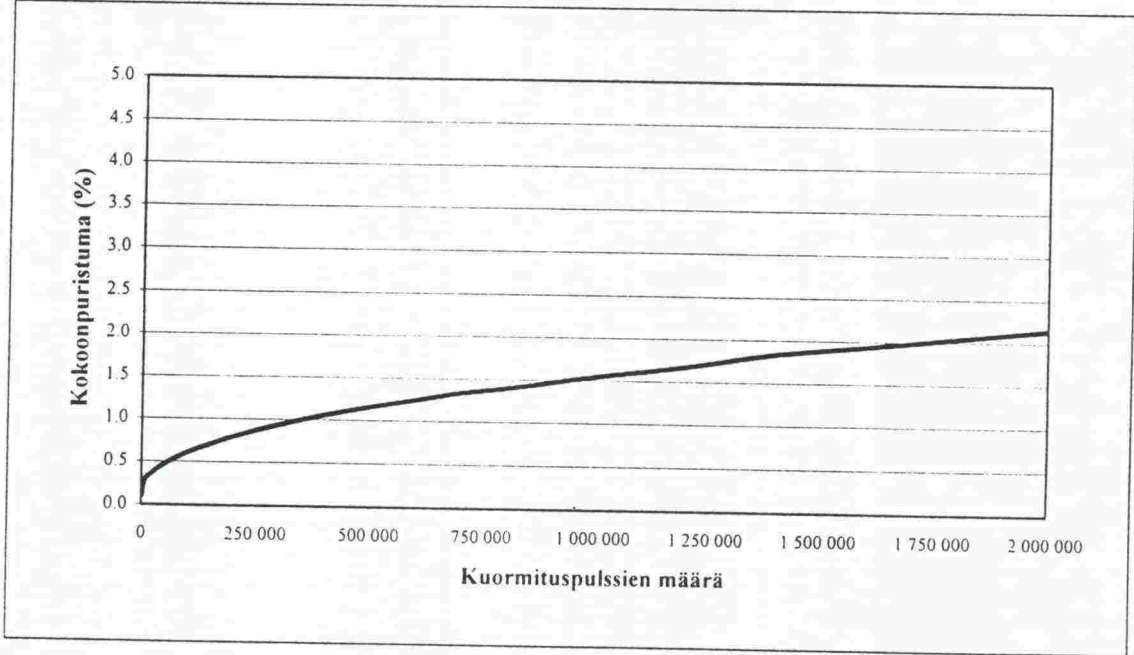
Väsymiskokeiden yhteenvetolomakkeet

6 sivua

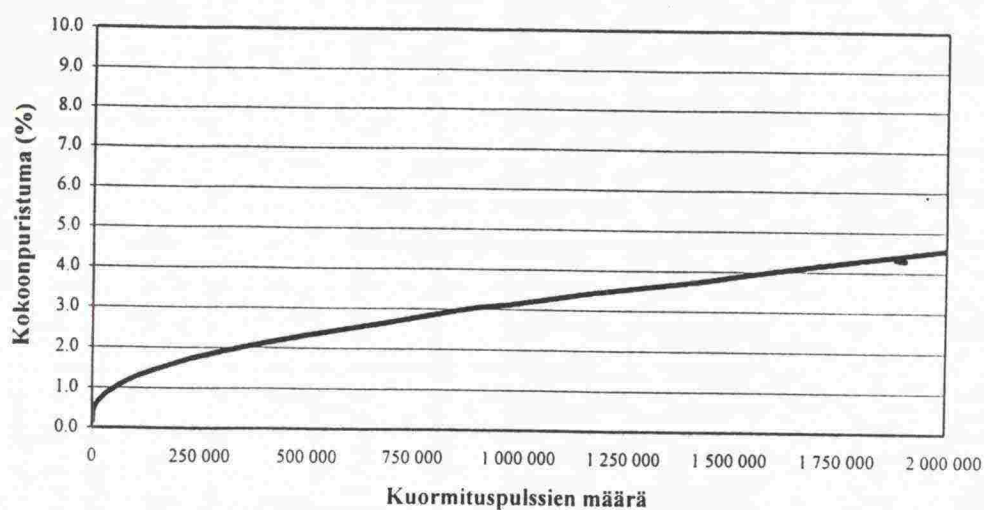
Kappaleen tunnus:		V 01	
Kokoonpuristuma kokeessa:		1.31 %	
Valmistaja:	Finnfoam	Kokeen alkamispäivä:	29.5.2000
Levyn tyyppi:	VR-80	Kuormitustaso:	200 kPa
Valmistuspäivä:	6.6.1999	Kuormitustapa:	Sileä levy
Valmistusaika:	17.34	Paksuus alussa	79.55 mm
Näytteen toimitus:	Valmistajan toimitus tehtaalta	Tiheys alussa:	41.66 kg/m3



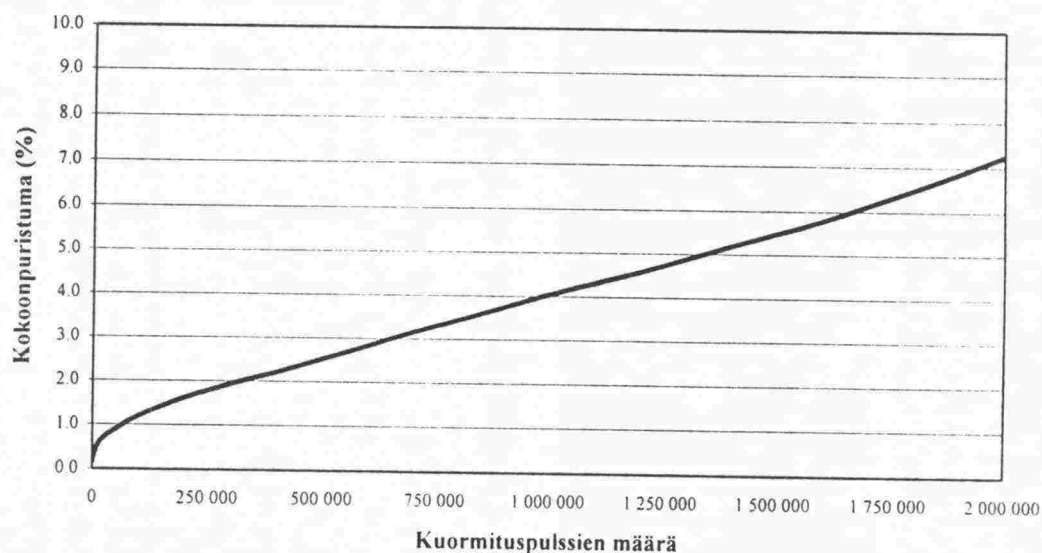
Kappaleen tunnus:		V 02	
Kokoonpuristuma kokeessa:		2.14 %	
Valmistaja:	Finnfoam	Kokeen alkamispäivä:	6.6.2000
Levyn tyyppi:	VR-80	Kuormitustaso:	275 kPa
Valmistuspäivä:	6.6.1999	Kuormitustapa:	Sileä levy
Valmistusaika:	17.34	Paksuus alussa	79.72 mm
Näytteen toimitus:	Valmistajan toimitus tehtaalta	Tiheys alussa:	41.84 kg/m3



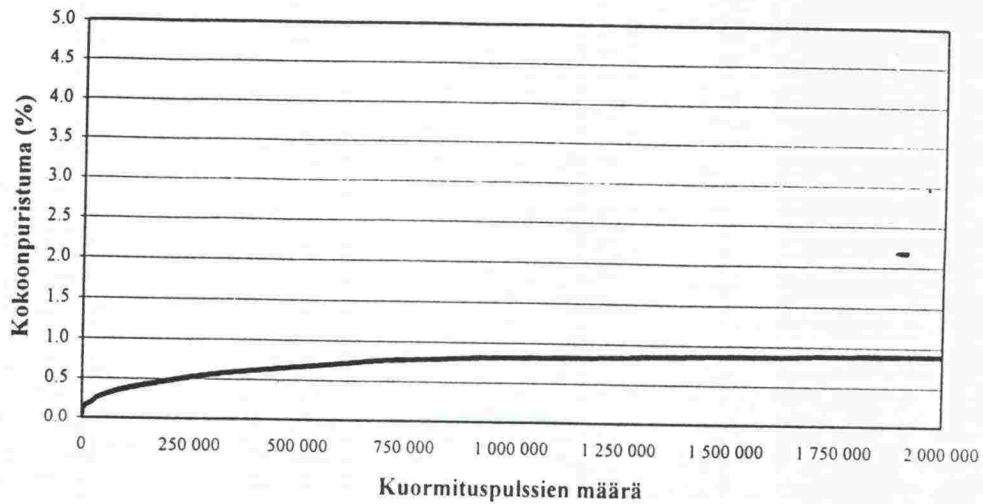
Kappaleen tunnus:		V 06	
Kokoonpuristuma kokeessa:		4.56 %	
Valmistaja:	Finnfoam	Kokeen alkamispäivä:	28.8.2000
Levyn tyyppi:	VR-80	Kuormitustaso:	300 kPa
Valmistuspäivä:	6.6.1999	Kuormitustapa:	Sileä levy
Valmistusaika:	17.35	Paksuus alussa	80.37 mm
Näytteen toimitus:	Valmistajan toimitus tehtaalta	Tiheys alussa:	41.79 kg/m3



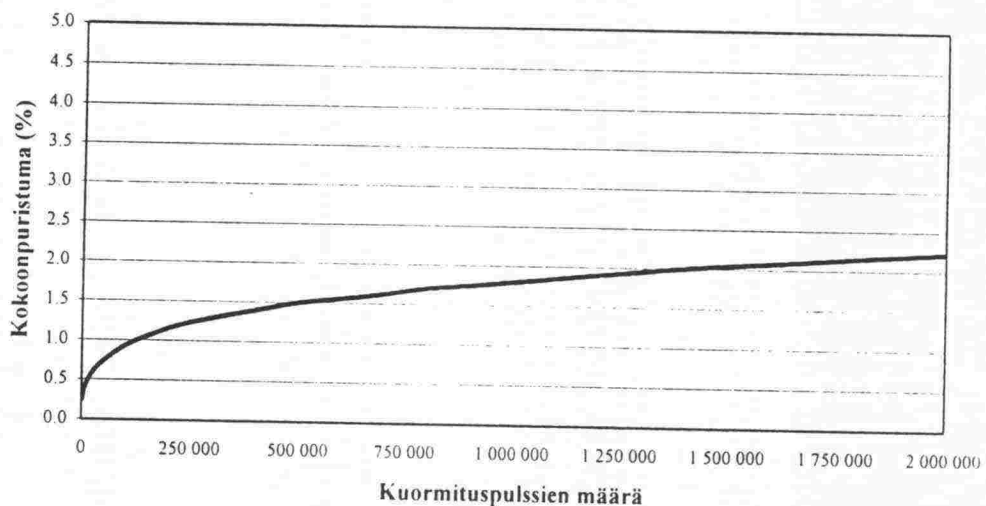
Kappaleen tunnus:		V 03	
Kokoonpuristuma kokeessa:		7.26 %	
Valmistaja:	Finnfoam	Kokeen alkamispäivä:	14.6.2000
Levyn tyyppi:	VR-80	Kuormitustaso:	300 kPa
Valmistuspäivä:	6.6.1999	Kuormitustapa:	Sileä levy
Valmistusaika:	17.34	Paksuus alussa	79.79 mm
Näytteen toimitus:	Valmistajan toimitus tehtaalta	Tiheys alussa:	41.78 kg/m3



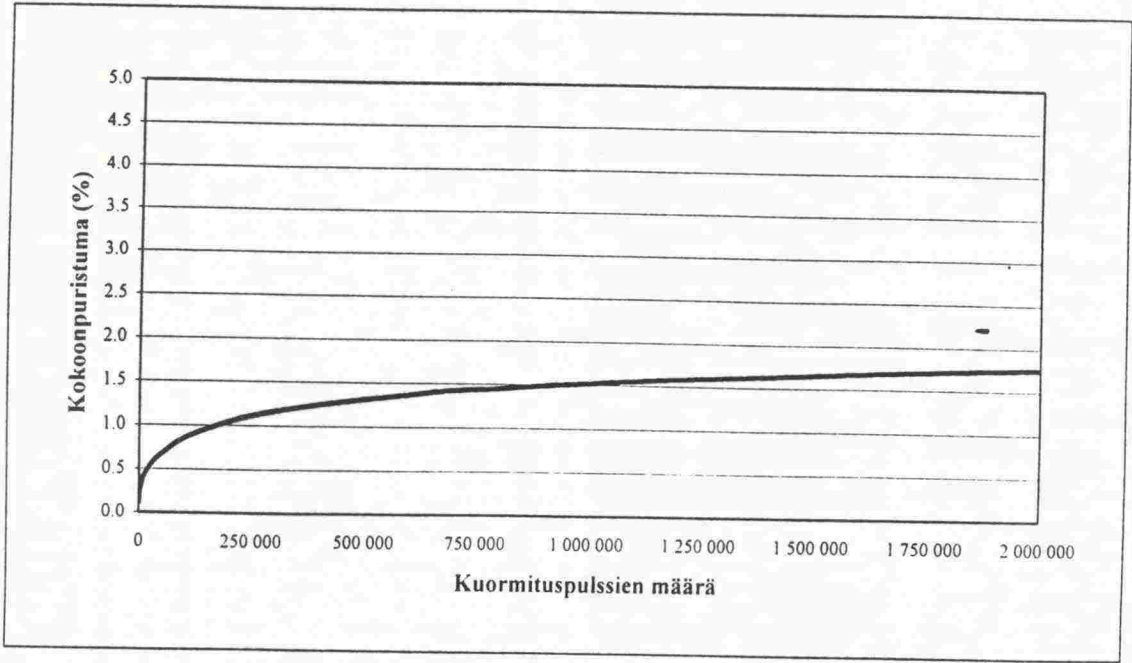
Kappaleen tunnus:		V 11	
Kokoonpuristuma kokeessa:		0.90 %	
Valmistaja:	Finnfoam	Kokeen alkamispäivä:	27.6.2000
Levyn tyyppi:	VR-80	Kuormitustaso:	200 kPa
Valmistuspäivä:	27.2.1999	Kuormitustapa:	Sileä levy
Valmistusaika:	5.47	Paksuus alussa	81.61 mm
Näytteen toimitus:	VR:n toimitus varastosta	Tiheys alussa:	44.25 kg/m3



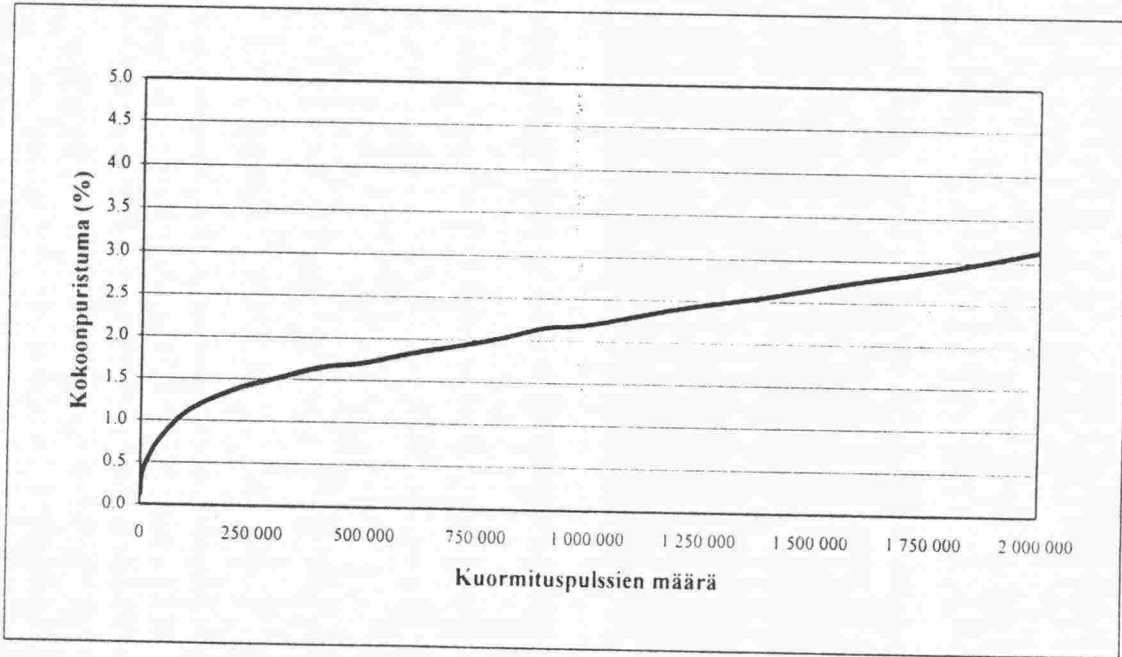
Kappaleen tunnus:		V 00	
Kokoonpuristuma kokeessa:		2.22 %	
Valmistaja:	Finnfoam	Kokeen alkamispäivä:	26.9.2000
Levyn tyyppi:	VR-80	Kuormitustaso:	200 kPa
Valmistuspäivä:	??	Kuormitustapa:	Sileä levy
Valmistusaika:	??	Paksuus alussa	99.66 mm
Näytteen toimitus:	Kaivettu radasta, Toijala	Tiheys alussa:	47.45 kg/m3



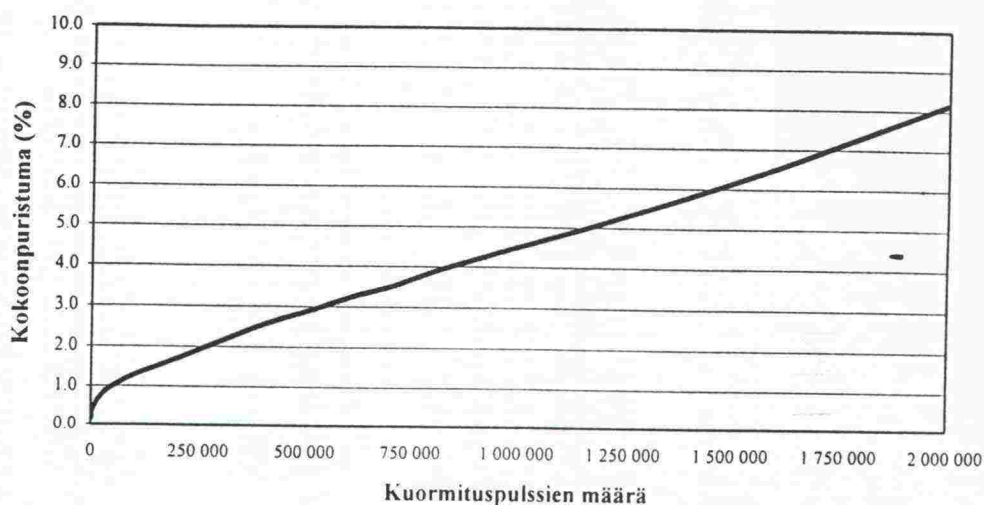
Kappaleen tunnus:		V 21	
Kokoonpuristuma kokeessa:		1.76 %	
Valmistaja:	Dow	Kokeen alkamispäivä:	31.7.2000
Levyn tyyppi:	Solimate 500 RS-A-N	Kuormitustaso:	200 kPa
Valmistuspäivä:	27.6.2000	Kuormitustapa:	Sileä levy
Valmistusaika:	20.12	Paksuus alussa	99.87 mm
Näytteen toimitus:	Valmistajan toimitus tehtaalta	Tiheys alussa:	38.68 kg/m3



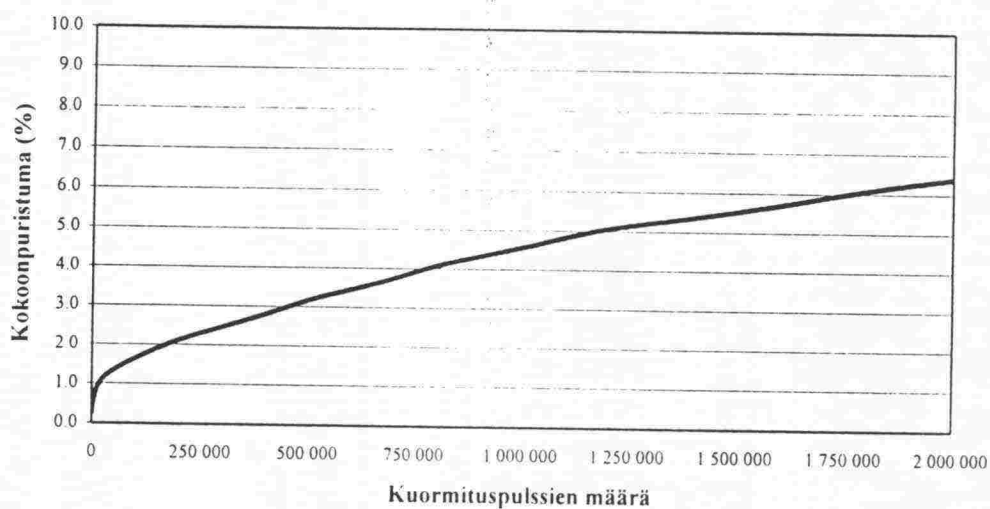
Kappaleen tunnus:		V 23	
Kokoonpuristuma kokeessa:		3.13 %	
Valmistaja:	Dow	Kokeen alkamispäivä:	15.8.2000
Levyn tyyppi:	Solimate 500 RS-A-N	Kuormitustaso:	240 kPa
Valmistuspäivä:	27.6.2000	Kuormitustapa:	Sileä levy
Valmistusaika:	20.12	Paksuus alussa	99.85 mm
Näytteen toimitus:	Valmistajan toimitus tehtaalta	Tiheys alussa:	38.88 kg/m3



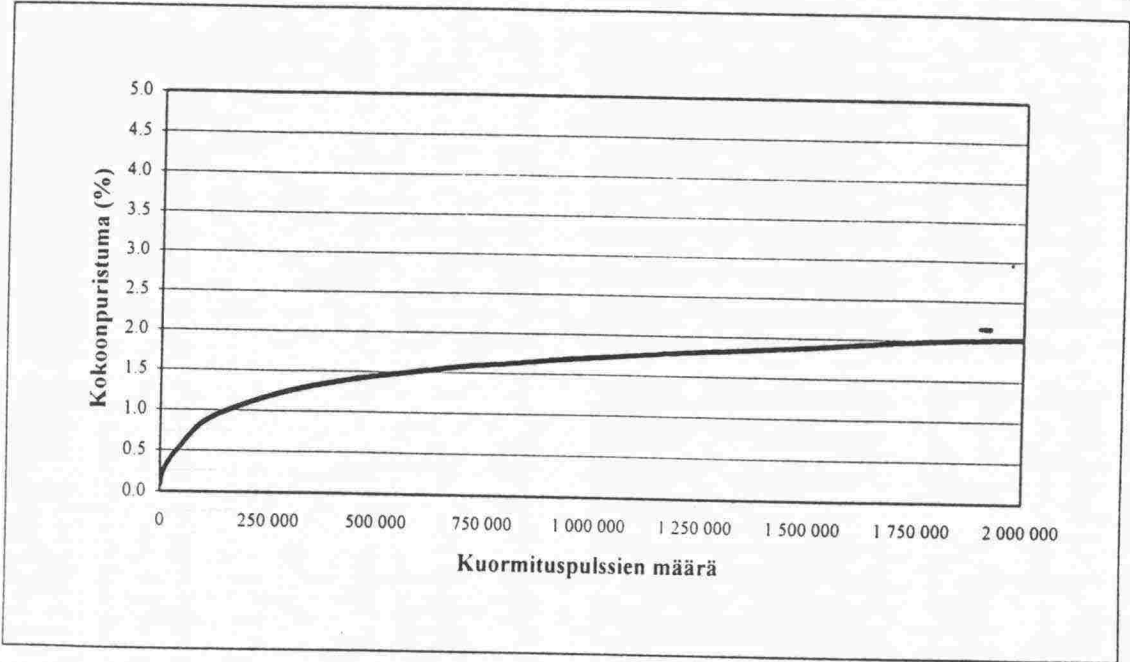
Kappaleen tunnus:		V 22	
Kokoonpuristuma kokeessa:		8.17 %	
Valmistaja:	Dow	Kokeen alkamispäivä:	8.8.2000
Levyn tyyppi:	Solimate 500 RS-A-N	Kuormitustaso:	275 kPa
Valmistuspäivä:	27.6.2000	Kuormitustapa:	Sileä levy
Valmistusaika:	20.12	Paksuus alussa	99.72 mm
Näytteen toimitus:	Valmistajan toimitus tehtaalta	Tiheys alussa:	38.81 kg/m3



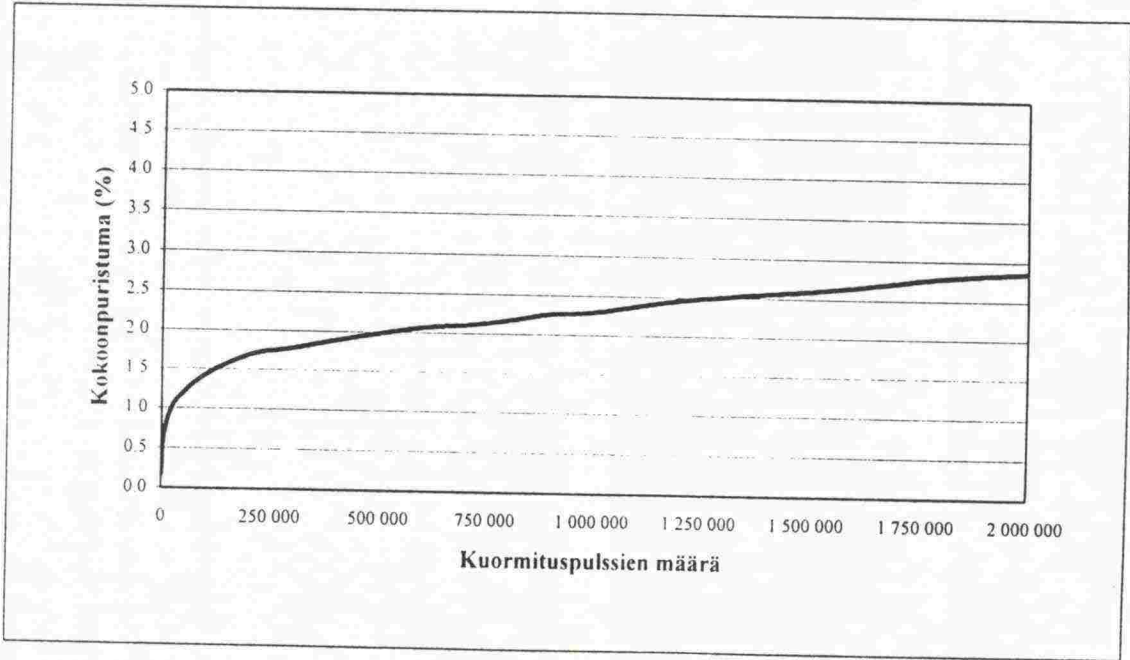
Kappaleen tunnus:		V 33	
Kokoonpuristuma kokeessa:		6.39 %	
Valmistaja:	Basf	Kokeen alkamispäivä:	18.9.2000
Levyn tyyppi:	Styrodur C-RHS	Kuormitustaso:	350 kPa
Valmistuspäivä:	?.?.1999	Kuormitustapa:	Sileä levy
Valmistusaika:	??	Paksuus alussa	81.25 mm
Näytteen toimitus:	Tilaajan toimitus varastosta	Tiheys alussa:	39.76 kg/m3



Kappaleen tunnus:		V 31	
Kokoonpuristuma kokeessa:		2.03 %	
Valmistaja:	Basf	Kokeen alkamispäivä:	4.9.2000
Levyn tyyppi:	Styrodur C-RHS	Kuormitustaso:	200 kPa
Valmistuspäivä:	?.?.1999	Kuormitustapa:	Sileä levy
Valmistusaika:	??	Paksuus alussa	81.38 mm
Näytteen toimitus:	Tilaaajan toimitus varastosta	Tiheys alussa:	39.67 kg/m3



Kappaleen tunnus:		V 32	
Kokoonpuristuma kokeessa:		2.87 %	
Valmistaja:	Basf	Kokeen alkamispäivä:	11.9.2000
Levyn tyyppi:	Styrodur C-RHS	Kuormitustaso:	275 kPa
Valmistuspäivä:	?.?.1999	Kuormitustapa:	Sileä levy
Valmistusaika:	??	Paksuus alussa	81.33 mm
Näytteen toimitus:	Tilaaajan toimitus varastosta	Tiheys alussa:	39.82 kg/m3



- 1/1997 Railway Industry Structures and Capital Investment Financing
 2/1997 Nopean junaliikenteen aluekehitysvaikutukset
 3/1997 Rautateiden henkilöliikenteen ennustemalli (RALVI)
 4/1997 Kilpailuedellytykset ja niiden luominen Suomen rataverkolla
 5/1997 Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2020
 1/1998 Rataverkon jatkosähköistytksen yhteiskuntataloudellinen vaikutusselvitys
 2/1998 Suomen rautatieliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä (RAILI 96)
 3/1998 Rautateiden tavarakuljetusten laatutekijät
 4/1998 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämistoiminta 1997 - 99
 5/1998 Rataverkon kehittämisen yhdyskuntarakenteellisten vaikutusten ja menetelmien arviointi
 6/1998 Yksityisrahoituksen käyttömahdollisuudet Suomen ratahankkeissa
 1/1999 Ratarakenteen instrumentoinnin kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 2/1999 Rautatieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset
 3/1999 Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 4/1999 Ratarakenteen instrumentointi- ja mallinnussuunnitelma, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 5/1999 Rautatietärinän mittauskäytäntö Pohjoismaissa
 6/1999 Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 7/1999 Rautatiesiltojen luokittelu ja inventointi rataosuudella Rautaruukki-Haaparanta akselipainojen korottamista varten
 8/1999 Ratarumpujen maastoselvitys, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 1/2000 Rataverkko 2020 -ohjelman väliraportti. Kehittämisvaihtoehtojen vaikutustarkastelut
 2/2000 Bantrummor, 250 kN och 300 kN axellaster
 3/2000 Liikkuvan kaluston kirjallisuustutkimus
 4/2000 Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään
 5/2000 Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 6/2000 Väliraportti 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen ratateknisistä tutkimuksista
 7/2000 Intermediate Report, 250 kN and 300 kN axle loads
 8/2000 Ratatekniset määräykset ja ohjeet -julkaisun käytettävyytstudkimus
 9/2000 Ratakapasiteetin perusteet
 10/2000 Instrumentation and Modelling of Track Structure, 250 kN and 300 axle loads
 11/2000 Rautatieonnettomuuksien sisäiset ja ulkoiset kustannukset
 12/2000 Internal and External Costs of Railway Accidents
 1/2001 Rataverkko 2020 -suunnitelma

RATAHALLINTOKESKUS
 KAIVOKATU 6, PL 185
 00101 HELSINKI

TEKNINEN YKSIKKÖ

Lisätietoja: Pasi Leimi, puh. (09) 5840 5184, sähköposti: pasi.leimi@rhk.fi
 Jakelu: Sinikka Kiiikka, puh. (09) 5840 5192, sähköposti: sinikka.kiiikka@rhk.fi

ISBN 952-445-047-x
 ISSN 1455-2604